

NOTIONS

DE PHYSIQUE

PARIS

NOTIONS

DE PHYSIQUE

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

PUBLIÉS PAR LA MÊME LIBRAIRIE.

NOTIONS DE CHIMIE, rédigées conformément au dernier programme de l'enseignement dans la classe de Seconde (section des lettres). 3e édition. 1 volume in-12 avec des gravures dans le texte. Prix, broché, 2 fr. 50 c.

COURS DE CHIMIE, rédigé conformément aux programmes de l'enseignement scientifique dans les lycées et à celui du baccalauréat ès sciences. 2e édition. 1 beau volume in-18 jésus avec des figures dans le texte. Prix, broché, 5 francs.

Ch. Lahure et Cie, imprimeurs du Sénat et de la Cour de Cassation,
rue de Vaugirard, 9, près de l'Odéon

NOTIONS

DE PHYSIQUE

RÉDIGÉES

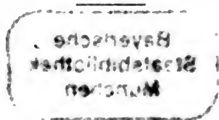
conformément aux derniers programmes de l'enseignement
pour les classes de Troisième et de Logique (section des lettres)
et pour le baccalauréat ès lettres

AVEC 204 GRAVURES DANS LE TEXTE

PAR

B. BOUTET DE MONVEL
Ancien élève de l'École normale supérieure
Professeur de physique et de chimie au lycée Charlemagne

TROISIÈME ÉDITION



PARIS
LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C[ie]
RUE PIERRE-SARRAZIN, N° 14
(Près de l'École de médecine)

1859



AVERTISSEMENT.

Ces notions de physique s'adressent spécialement aux élèves de Troisième et de Logique littéraire qui se préparent au baccalauréat ès lettres. Elles ont été rédigées conformément au programme officiel, et toutes les matières exigées y sont traitées sous une forme élémentaire, J'y ai joint dans un chapitre spécial un certain nombre de problèmes simples, avec leurs solutions, dans le but de faire comprendre la méthode à suivre pour traiter ces questions. Enfin j'ai ajouté un chapitre consacré à la météorologie, le programme de logique admettant, mais d'une manière accessoire, il est vrai, quelques leçons sur cette partie si intérressante de la physique.

Mes lecteurs ne seront point étonnés de voir reproduits presque textuellement, dans ce nouvel ouvrage, bon nombre des chapitres du volume destiné primitivement aux seuls élèves de Troisième ; un professeur a une méthode d'enseignement qui lui est propre; quand une démonstration lui paraît claire, complète et satisfaisante pour des enfants de quinze ans elle l'est aussi pour des jeunes gens de dix-huit. Pourquoi la changerait-on alors! Aussi ne me suis-je fait aucun scrupule de me copier moi-

même, en ajoutant d'ailleurs les compléments exigés par l'intelligence plus développée de mes nouveaux lecteurs.

Toutefois, pour ne point égarer les élèves de Troisième en dehors des limites de leur propre programme, j'ai eu soin de faire imprimer en petits caractères les matières qui appartiennent exclusivement au cours de Logique, et qui ne sont point comprises dans le cours de Troisième littéraire : ainsi le chapitre entier sur le magnétisme, le chapitre sur la chaleur rayonnante, et la partie de l'optique relative à la vision et aux instruments d'optique, partie toute nouvelle dans cette dernière édition.

B. BOUTET DE MONVEL.

NOTIONS

DE PHYSIQUE.

CHAPITRE I.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

On appelle *matière* tout ce qui affecte nos sens, et *corps* toute portion limitée de la matière.

La chaleur, l'électricité, la lumière agissent sur nos sens, et sont, non point de la matière, mais un état particulier de la matière. Elles rentrent ainsi dans la définition générale.

Les corps se distinguent les uns des autres par certaines manières d'agir qui leur sont particulières et qu'on appelle leurs *propriétés*. Toute modification, quelque simple qu'elle soit, qui survient dans l'état d'un corps, constitue ce que l'on appelle dans la science un *phénomène*. Si on abandonne à elle-même une pierre que l'on tient à la main, elle tombe vers la terre : c'est là un phénomène de mouvement. On voit que nous donnons à ce mot de phénomène un sens bien différent de celui que lui prête le vulgaire. Dans la langue de la conversation, on entend en effet assez habituellement par phénomène un fait extraordinaire, un être bizarre, une anomalie. Lorsque la modification subie par le corps n'altère point sa substance, elle porte le nom de phénomène physique ; ainsi un barreau d'acier que l'on frotte avec un aimant

devient lui-même un aimant, mais sans cesser pour cela de présenter tous les caractères de l'acier. Un morceau de soufre frotté sur du drap acquiert passagèrement la propriété d'attirer les corps légers. Si vous le chauffez, il devient liquide; si vous le chauffez plus fort, il se transforme en vapeur, mais sous ces différents états, il reste toujours soufre. Ses propriétés physiques, celles qui tiennent à sa constitution mécanique, ont seules changé, mais sa substance est restée la même.

Mais si la substance est altérée, si le corps perd quelques-uns de ces principes constituants, ou s'il s'unit à des corps d'une nature autre que la sienne, alors le phénomène reçoit le nom de phénomène chimique. Ainsi, le soufre chauffé avec du fer forme une substance complétement nouvelle, douée de propriétés toutes spéciales, autres que celles du fer et du soufre. La formation de ce nouveau corps est le résultat d'une action chimique.

Nous nous proposerons dans ce cours l'étude du premier ordre de phénomènes. Mais nous ferons remarquer qu'il y a une telle connexité entre les phénomènes physiques et les phénomènes chimiques, qu'il nous sera presque impossible de ne pas faire de temps en temps une excursion sur le domaine de la chimie, de même que dans le cours de chimie il nous faudra très-souvent faire appel aux principes de la physique.

Les corps ne sont point eux-mêmes la cause des modifications qu'ils subissent. Cette cause est distincte de leur substance. On lui donne le nom de *force* ou *agent*.

Propriétés générales. — Parmi les propriétés que nous aurons à étudier, il en est quelques-unes qui appartiennent exclusivement à un corps déterminé ou à un petit nombre de corps, d'autres qui sont l'apanage d'une certaine classe de substances, mais il en est aussi qui appartiennent à tous les corps sans exception, et que l'on appelle à cause de cela *propriétés générales*. Comme leur connaissance est liée d'une manière intime à celle de la constitution des corps eux-mêmes, nous ferons de leur étude l'objet de ce premier chapitre.

Ces propriétés générales sont :

L'étendue, l'impénétrabilité, la divisibilité, la porosité, la compressibilité, l'élasticité, la mobilité et l'inertie.

1° *Étendue.* Tous les corps, quels qu'ils soient, occupent une certaine place dans l'espace : c'est là ce que l'on veut exprimer lorsque l'on dit que tous les corps sont étendus. La géométrie a précisément pour but la mesure de l'étendue sous les différentes formes qu'elle peut affecter, longueur, surface ou volume. Mais les procédés qu'elle indique ne sont applicables qu'à un bien petit nombre de cas, et, si l'on considère l'infinie variété des formes que nous présentent les corps, on pourra tout de suite juger de l'insuffisance de cette science. Nous verrons plus tard que la physique nous fournit un moyen de mesurer le volume d'un corps, quelque irrégulier qu'il soit, pourvu qu'on ait une balance pour le peser.

2° *Impénétrabilité.* Quand en physique on dit que les corps sont *impénétrables*, on veut dire que deux corps ne peuvent occuper en même temps une même place dans l'espace. Nous rencontrons encore là un mot dont le sens est en désaccord apparent avec celui qu'on lui donne dans le langage ordinaire. N'entend-on pas dire à chaque instant qu'un clou *pénètre* dans une planche, que la main *pénètre* dans l'eau, pour exprimer que le clou *déplace* les fibres du bois et va se loger dans l'espace qu'elles ont laissé libre en s'écartant, ou bien que la main divise la masse d'eau ? Mais il n'entre pas dans la pensée de celui qui se sert ainsi du mot *pénétrer* que le clou et le bois, ou que la main et l'eau soient simultanément à la même place, pas plus qu'on ne croit que lorsque l'eau imbibe un tas de sable ou un pavé de grès, l'eau occupe la même place que les grains de sable ou les particules du grès.

Ces deux propriétés de l'étendue et de l'impénétrabilité présentent ce caractère tout spécial qu'il est impossible de concevoir l'existence d'un corps sans ces propriétés, tandis qu'il ne répugne point à la pensée de supposer l'existence d'un corps que l'on ne pourrait point diviser ou comprimer.

3° *Divisibilité.* Tous les corps sont divisibles en parties plus petites. Les substances les plus dures comme l'acier et le diamant peuvent être brisées et pulvérisées. C'est, en effet, avec la poudre de diamant que l'on use et que l'on polit les diamants pour leur donner ce que l'on appelle la taille. Mais quoique dans la pensée cette division de la matière puisse être poursuivie indéfiniment, puisque, quelque petit que soit un corps, on conçoit qu'il puisse être partagé en deux fragments, en fait cependant cette division est limitée. Lorsque nous brisons entre nos mains un morceau de craie, nous nous trouvons promptement arrêtés par les difficultés de saisir et de presser convenablement les fragments. Si nous mettons alors la craie dans un mortier, et si nous l'écrasons avec un pilon, au bout d'un certain temps les grains sont amenés à un degré de ténuité que nous ne pouvons plus dépasser, le travail dût-il durer tout un jour. Les forces mécaniques dont nous pouvons disposer sont limitées, et il en est de même de tous les agents quels qu'ils soient. Le mot *atome*, dont on fait usage si fréquemment dans la science, ne signifie donc pas une partie d'un corps théoriquement et absolument insécable, il signifie seulement le dernier degré de division auquel un corps puisse arriver par l'emploi d'un certain ordre de forces. Les atomes chimiques seront plus petits que les atomes mécaniques, si les forces chimiques ont une puissance de division supérieure à celle des forces mécaniques.

La nature nous fournit des exemples d'une division prodigieuse et que l'esprit a peine à concevoir. Tout le monde a entendu parler de ces petits êtres appelés animalcules infusoires, que le microscope fait découvrir dans une goutte d'eau. Ces animaux, tout aussi bien que les êtres les plus gigantesques, comme l'éléphant et la baleine, ne vivent qu'à la condition de prendre des aliments et de les digérer; il leur faut donc un appareil digestif; que l'on juge alors des dimensions des organes qui composent l'appareil digestif de semblables animaux! Mais il y a plus : les infusoires sont carnassiers, c'est-à-dire qu'ils

se nourrissent d'animaux plus petits qu'eux et peut-être aussi carnassiers eux-mêmes. Où cette division s'arrête-t-elle? Sans doute bien au delà des limites de notre vue, aidée même des plus puissants microscopes.

Les matières colorantes et les odeurs nous offrent aussi des exemples curieux de division extrême. Une goutte de carmin versée dans une grande carafe d'eau donne au liquide une colororation très-marquée. Cette coloration se manifeste en tous les points de l'eau; ainsi la gouttelette rouge s'est diffusée dans toute la masse liquide et a fourni de la matière colorante à toutes ses parties. Un morceau de musc qu'on laisse séjourner quelque temps dans un tiroir l'infecte à un tel point qu'au bout de vingt ou trente années, quoique l'air soit renouvelé plusieurs fois par jour, l'odeur persiste encore avec une très-grande force. Si l'on se représente que toutes les fois qu'on a changé l'air du tiroir, le gaz en sortant a emporté avec lui les principes odorants qui s'y trouvaient disséminés, on voit tout de suite quelle immense quantité de particules a dû renfermer le morceau de musc.

Les forces mécaniques sont, sans aucun doute, de toutes les forces que nous pouvons mettre en jeu, celles qui nous permettent le moins d'approcher de ce degré extrême de division dont nous venons de donner des exemples, et cependant nous pourrions encore citer des faits qui prouvent que, par l'emploi de moyens purement mécaniques, on arrive à une limite de division déjà bien reculée. Wollaston est parvenu à étirer un fil de platine pesant un gramme, de manière à lui donner une longueur de 20 000 mètres. Le moyen qu'il employait pour cela est à la fois très-simple et très-ingénieux. Il tendait dans l'axe d'un moule cylindrique un fil de platine, et il coulait alentour de l'argent fondu, puis il faisait passer ce lingot dans les trous d'une filière de manière à lui donner à chaque passage un diamètre plus petit et une longueur plus grande. Il mettait ensuite le fil ainsi obtenu dans le liquide que les graveurs appellent l'*eau-forte*. L'argent se dissolvait et le fil de platine se trouvait mis à nu. Il était

si fin que la loupe seule permettait de le voir bien nettement. Or, si on se représente cette longueur de 20 kilomètres partagée en dixièmes de millimètre, on aura ainsi 200 millions de parties visibles à l'œil dans un gramme de substance.

4° *Porosité*. Non-seulement cette division est possible, mais elle existe de fait dans les corps. La matière qui les compose n'est pas continue. Elle est répartie en petites masses appelées *molécules* tenues à distance les unes des autres. Les molécules, comme les distances qui les séparent, sont infiniment trop petites pour que nos sens imparfaits puissent les distinguer; mais si nous ne pouvons point nous assurer directement que tel est l'état des corps, du moins est-il des faits, conséquences de leur constitution même, qui nous sont démontrés par l'expérience, et qui établissent d'une manière incontestable les principes que nous venons de mettre en avant.

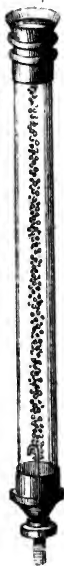


Fig. 1.

Prenons un tube en cristal d'environ 1 mètre de hauteur et 6 à 7 centimètres de diamètre, muni à son extrémité inférieure d'une monture en cuivre mastiquée sur le verre. A cette monture est vissé un robinet surmonté d'un petit tube recourbé qui vient s'ouvrir dans le cylindre de cristal à 1 décimètre du fond (fig. 1). A l'autre extrémité du cylindre se trouve une autre monture en cuivre ouverte librement. On ferme cette ouverture avec un couvercle en forme de boîte et dont le fond est fait soit avec une plaque de chêne taillée perpendiculairement aux fibres du bois, soit avec une peau de chamois. Les rebords de la monture sont enduits de suif, pour que le couvercle ferme plus hermétiquement. On visse alors le robinet sur la platine de la machine pneumatique, appareil que nous décrirons plus tard et qui sert à enlever l'air d'un vase fermé; puis on verse dans la boîte à fond de chêne ou de peau une couche de mercure d'un ou deux

centimètres d'épaisseur. Si on fait alors manœuvrer la machine pneumatique de manière à enlever l'air qui remplit le tube, on voit le mercure tomber en pluie fine après avoir passé au travers de la peau ou du bois. Il est évident qu'il ne pourrait traverser ces corps s'ils étaient formés d'une matière continue. Ainsi le bois et la peau présentent dans leur masse des interstices, des vides dans lesquels le mercure a pu se glisser et se frayer un passage. Ces petits espaces vides sont appelés les *pores*. Si le mercure n'est pas tombé dès l'instant où on l'a mis dans la boîte, c'est parce que les pores étaient déjà occupés par un autre corps. Comme la matière est impénétrable, le mercure ne pouvait passer qu'à la condition que l'air lui céderait la place. Les vides du bois étaient trop petits pour que le mercure et l'air pussent circuler en même temps, à côté l'un de l'autre. Aussi a-t-il fallu expulser d'abord l'air en l'aspirant avec la machine pneumatique.

Nous avons tenu à montrer tout de suite la porosité des substances empruntées aux tissus des animaux et des végétaux, et l'on en comprend le motif. Les aliments que nous introduisons dans notre corps sont, comme tout le monde le sait, conduits de la bouche à l'estomac, de l'estomac aux intestins et de là rejetés au dehors en suivant les replis d'un tube membraneux appelé tube digestif, qui n'a aucune communication apparente avec les organes qui l'entourent. Il faut cependant que la portion nutritive des aliments pénètre dans la profondeur des organes, dans toutes les parties du corps, pour les nourrir, les accroître dans la période de la jeunesse, ou réparer leurs pertes dans l'âge où la croissance est complète. Ces pertes sont réelles, comme on peut s'en assurer en se pesant immédiatement après un repas, puis se pesant de nouveau après un jeûne de quelques heures. C'est par l'effet de la porosité des membranes et de tous les tissus en général que les matières alimentaires, rendues fluides par la digestion, peuvent traverser la paroi du tube digestif, puis pénétrer de proche en proche jusqu'aux

organes les plus éloignés. Il en est de même pour les végétaux.

La porosité ne se rencontre pas seulement dans les tissus organisés des êtres vivants, nous la trouverons également dans les substances minérales. Ainsi, c'est par l'effet de la porosité que le café monte dans un morceau de sucre que l'on met en contact par sa partie inférieure avec la liqueur. Si une goutte d'huile déposée sur du marbre pénètre, dans le sens vulgaire du mot, à une assez grande profondeur dans la pierre, c'est encore à la porosité qu'il faut l'attribuer. C'est toujours par le même motif qu'un morceau de grès, plongé dans l'eau, s'imprègne de ce liquide jusque dans ses parties les plus centrales. Il faut remarquer qu'au moment où le grès est introduit dans l'eau il s'en échappe des bulles d'air qui montent à la surface du liquide. Cet air était logé dans les pores de la pierre; l'eau, en s'y introduisant, en chasse peu à peu le gaz. L'effet est plus manifeste avec le sucre, parce que l'eau, en vertu de son action dissolvante, agrandit rapidement les intervalles moléculaires et permet à l'air de s'échapper plus rapidement. Il n'est pas jusqu'aux corps les plus compactes en apparence, comme les métaux, qui ne manifestent d'une manière très-nette la porosité, comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant.

Quant aux liquides et aux gaz, leur porosité est évidente; puisque les liquides peuvent se mélanger entre eux, et se mélanger aussi aux corps solides, comme cela arrive quand on dissout du sucre dans l'eau; puisque les gaz se mélangent entre eux et se dissolvent dans les liquides, témoin l'eau de Seltz.

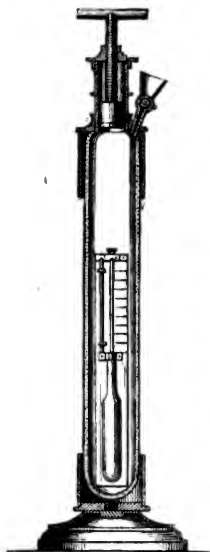
5° *Compressibilité*. Tous les corps sont compressibles, c'est-à-dire que, soumis à une pression exercée sur leur surface, ils diminuent de volume. La même quantité de matière se trouve réduite à occuper un espace moindre, ce que l'on exprime en disant que le corps est devenu plus *dense*.

Lorsqu'une colonne de fonte est chargée d'un poids

considérable, elle subit un raccourcissement très-appréciable. Il est vrai qu'en même temps son diamètre s'accroît un peu, mais cet accroissement du diamètre n'est pas en proportion du raccourcissement de l'axe, et l'effet produit est en résumé une diminution de volume et un accroissement de densité. Il en serait de même pour une colonne de pierre, ou pour un bloc de bois. La connaissance de l'écrasement qu'une colonne peut ainsi subir sous l'influence d'une certaine charge, est, comme on le pense bien, d'une haute importance; car, dans les constructions, il faudra proportionner les dimensions des colonnes aux pressions qu'elles auront à supporter, pour resserrer dans des limites très-étroites la quantité dont elles peuvent se raccourcir, et assurer la solidité de l'édifice.

On a cru longtemps l'eau et les liquides en général incompressibles. On citait comme preuve l'expérience faite par les savants de l'Académie *del Cimento* à Florence. Voici en quoi consistait cette expérience. On démontre en géométrie que de tous les solides, ayant même surface, la sphère est celui qui comprend le plus grand volume. Il suit de là qu'une enveloppe sphérique creuse que l'on déforme d'une manière quelconque prend un volume plus petit. Les académiciens de Florence remplirent alors complétement d'eau une sphère d'or et fermèrent hermétiquement l'ouverture d'introduction à l'aide d'un bouchon en or soudé sur les parois; puis, pressant la sphère à l'aide d'un étau, ils cherchèrent à la déformer. Le changement de figure eut lieu, et, de plus, ils virent l'eau suinter en gouttelettes par tous les points de la surface de la sphère. Ils en tirèrent la conclusion que le volume de l'eau était resté invariable, tandis que le volume de la sphère avait diminué, ce qui expliquait sa sortie; qu'en un mot, l'eau était incompressible. Il est facile de comprendre que ces conclusions étaient prématurées; car tout ce que l'expérience prouvait, c'est que la diminution de volume de l'eau était moindre que la diminution de volume de son enveloppe. En revanche, elle établissait clairement la porosité des métaux.

Voici, au surplus, comment on peut démontrer que l'eau est compressible (fig. 2). On prend pour cela un cylindre en cristal fermé à sa partie inférieure par une monture en cuivre bien mastiquée, et muni à son extrémité supérieure d'une autre monture en cuivre se terminant par un col cylindrique d'un diamètre moindre que le cylindre principal. Un bouchon métallique, faisant l'office de piston, glisse dans ce cylindre, qu'il ferme hermétiquement; on peut à volonté le faire monter ou descendre à l'aide d'une vis. Un petit robinet latéral sert à compléter le remplissage du tube. On a à l'avance rempli d'eau tout l'appareil, le piston étant le plus haut possible. Si l'on fait tourner la vis, le piston descend, et comme il ne peut descendre qu'en repoussant l'eau, il s'ensuit que la compressibilité est démontrée.


Fig. 2.

On peut cependant opposer à l'expérience faite dans ces conditions une objection très-plausible. Le cylindre de verre éprouve de la part du liquide une pression de dedans en dehors qui tend à accroître son diamètre ; on pourrait alors penser que l'eau refoulée par le piston se loge dans le nouvel espace qui lui est fourni par l'écartement des parois. Mais si la pression s'exerçait en dehors aussi bien qu'en dedans, alors cet écartement ne se produirait plus. C'est ce qu'on réalise à l'aide d'une addition que nous allons signaler.

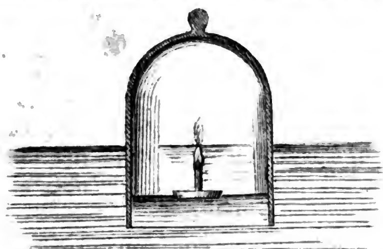
A l'intérieur de l'appareil, tel que nous venons de le décrire, on établit sur une tablette de métal un tube de verre d'environ deux centimètres de diamètre, fermé en bas, soudé à sa partie supérieure à un second tube de plus petit diamètre formant un col cylindrique. Un liquide quelconque, de l'eau par exemple, remplit le cy-

lindre inférieur et la moitié du col. Une petite goutte de mercure est déposée sur la surface de l'eau ; et comme le tube est très-étroit et que le mercure ne peut alors déplacer le liquide, il reste sur l'eau, quoique beaucoup plus lourd qu'elle. Une graduation est tracée sur la tablette à coté du col. Cet appareil est entièrement plongé dans l'eau qui remplit le grand cylindre.

Quand on vient à faire descendre le piston, on voit la gouttelette de mercure descendre dans le tube. Ici l'expérience est plus complète, puisqu'il y a, pour le vase, pression extérieure en même temps que pression intérieure, et que cependant le niveau du liquide s'abaisse.

Cet appareil est connu dans les cabinets de physique sous le nom de *piézomètre d'Œrsted.*

Quant aux gaz, leur compressibilité est beaucoup plus facile à constater. Ainsi, posons sur l'eau une petite bougie allumée, fixée sur un morceau de liége, puis mettons par-dessus une cloche dont les bords plongent légèrement dans l'eau (fig. 3) : si avec la main nous forçons la cloche à enfoncer petit à petit dans l'eau, nous verrons la petite bougie s'enfoncer avec elle ; mais la surface de l'eau qui la porte ne restera pas au niveau des bords de la cloche, elle montera dans cette cloche d'autant plus qu'on enfoncera davantage, de telle sorte que la couche d'eau, déprimée par l'air en vertu de l'impénétrabilité, aura cependant diminué le volume de la masse gazeuse.


Fig. 3.

Nous pourrions aussi prendre le petit instrument représenté dans la fig. 4. C'est un tube cylindrique fermé hermétiquement à une extrémité et ouvert à l'autre. On engage dans le tube une tige formant piston, c'est-à-dire présentant un tête cylindrique qui glisse dans le tube

en le fermant complétement. Une pression convenablement graduée refoule petit à petit l'air de cet appareil, et permet au piston d'arriver presque jusqu'au fond du tube.


Fig. 4.

Il n'y aurait plus lieu à objecter ici la dilatation de l'enveloppe, cette dilatation étant certainement négligeable devant la variation considérable du volume du gaz, au moins tant qu'il s'agit simplement de montrer la compression de l'air.

Ainsi l'air diminue de volume. Lorsqu'on refoule violemment le piston, la compression de l'air développe assez de chaleur pour enflammer un petit morceau d'amadou fixé à la tête du piston. C'est ce qui a fait donner à cet instrument le nom de *briquet à air*.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que si les corps sont compressibles, ils sont aussi dilatables.

6° *Élasticité*. On désigne sous ce nom la propriété que possèdent *tous* les corps, pris sous un certain volume ou avec une certaine forme, puis modifiés par l'action d'une force, de revenir à leur premier volume, à leur première forme, dès l'instant où cette force cesse d'agir, *pourvu toutefois que l'écart n'ait pas dépassé une certaine limite*.

Ainsi dans l'expérience du briquet à air, si, après avoir refoulé le piston avec la main dans l'intérieur du cylindre, on l'abandonne à lui-même, on le voit revenir sur ses pas et retourner *vers* son point de départ. On comprend que le frottement qu'il éprouve doit éteindre assez promptement son mouvement; il ne faudra donc point s'étonner s'il ne reprend pas tout à fait sa position initiale.

De même dans l'expérience indiquée pour la démonstration de la compressibilité de l'eau, si, lorsque le piston est arrivé au point le plus bas, on ouvre le robinet, l'eau jaillit immédiatement par l'ouverture et reprend ainsi le volume qu'elle avait perdu.

Une tige d'acier bien droite que l'on fixe par un de ses bouts, puis que l'on fléchit légèrement, revient à la ligne

droite dès l'instant où on la laisse à elle-même. Il est vrai qu'elle n'y revient pas immédiatement; elle dépasse la position de la ligne droite et se fléchit dans l'autre sens, puis elle est rappelée par l'élasticité vers la ligne droite, la dépasse de nouveau dans le premier sens, y retourne encore et ainsi de suite, accomplissant ainsi un mouvement d'une nature particulière qu'on appelle *mouvement de vibration* ou *d'oscillation*. Ces vibrations, dont la cause est précisément l'élasticité, décroissent, puis s'éteignent, et la tige se trouve, au bout d'un certain temps, revenue à sa première position.

Lorsqu'une bille d'ivoire ou d'agate tombe sur une surface plane et dure, elle rebondit. Ce phénomène bien connu est encore dû à l'élasticité. Il est facile de voir que la bille, au moment du choc, se déforme et s'écrase dans le sens du choc. Pour le rendre évident, on n'a qu'à étendre sur la surface plane une couche mince de suif. En y déposant doucement la bille, on fera sur le suif une petite tache. Si on laisse la bille tomber de haut, la tache pourra être sept ou huit fois plus large; ce qui ne s'explique qu'en admettant que la bille s'est écrasée et a pu alors enlever le suif sur une plus grande surface. Si, après cela, on replace la bille doucement, elle fait la même petite tache étroite qu'elle faisait dans le principe. Elle a donc repris sa première forme sphérique. Elle n'a pu y revenir qu'en repoussant le plan, et comme le plan n'a pas cédé à sa pression, c'est alors elle qui a reculé en rebondissant. Le même effet se produit aussi avec une goutte d'eau qui tombe à terre, et toujours pour la même cause.

Il peut sembler étrange que nous affirmions que tous les corps sont élastiques, car il est un certain nombre de corps que l'on est habitué à regarder comme non élastiques et qu'on appelle des corps *mous*, le plomb, par exemple. Cette idée est-elle exacte, et le plomb est-il dénué d'élasticité? Lorsque nous plions une tige d'acier d'une certaine quantité, et que nous l'abandonnons ensuite, elle revient à sa première forme. Cependant elle

n'y retourne complétement que si l'écart qu'on lui a donné n'a pas été trop considérable. Prenons maintenant une tige d'étain, elle se comportera comme la tige d'acier, avec cette différence que si on a pu écarter la tige d'acier hors de la ligne droite d'une quantité assez considérable sans qu'elle cessât d'y revenir exactement, il ne faut au contraire écarter la tige d'étain que d'un angle très-petit, sans cela, elle ne reprendrait pas sa position première. Il en est de même, sans aucun doute, pour le plomb : seulement, la différence que nous avons constatée entre l'acier et l'étain se présente entre l'étain et le plomb. L'écart que le plomb peut supporter dans les limites de son élasticité est tellement petit, que notre œil ne peut pas le constater. Tout déplacement donné au plomb, appréciable à notre vue, dépasse cette limite d'élasticité, et le plomb nous paraît mou.

7° *Mobilité. — Inertie.* Tout corps sollicité par une force entre *nécessairement* en mouvement s'il est libre dans l'espace, et ce mouvement ne peut cesser que par l'action contraire d'autres forces. Le corps ne peut ni se donner le mouvement ni se l'ôter. C'est ce qu'on exprime en disant qu'il est mobile et inerte à la fois. Au surplus les questions de mouvement sont moins du ressort de la physique que de celui de la mécanique, et nous ne traiterons de ces questions délicates qu'autant qu'elles se rattacheront indispensablement aux matières du cours.

Disons seulement que toutes les fois qu'un corps est soumis à l'action d'une force seule, il doit nécessairement lui obéir, et le sens de son mouvement, ou la droite qu'il parcourt, indique la direction de la force. Nous disons la droite, parce que le corps ne pouvant de lui-même modifier en rien le mouvement qu'il a reçu, il ne peut y avoir changement de direction dans la route suivie qu'autant qu'une autre force viendrait agir sur le mobile, pour le détourner de cette route.

Si plusieurs forces agissent simultanément sur un même corps, il peut se faire qu'il y ait mouvement. Dans ce cas, le mouvement n'ayant évidemment lieu que dans

une certaine direction unique, une force convenable, qui agirait dans cette direction précisément, pourrait à elle seule déterminer ce même mouvement. Elle pourrait donc remplacer le système des forces données et s'appelle sa *résultante*.

On convient de représenter une force par une droite, dont la direction dans l'espace est celle du mouvement que prendrait le mobile obéissant à l'action de cette force, et dont la longueur est proportionnelle à l'intensité de la force.

Lorsque deux forces agissent simultanément sur un même point, elles ont toujours une résultante; et l'on démontre en mécanique que cette résultante est représentée, en grandeur comme en direction, par la diagonale du parallélogramme qui aurait pour côtés les lignes représentant les deux forces. — Ainsi AB, AC étant deux forces agissant sur un même point A, leur résultante est la diagonale AD (fig. 5).

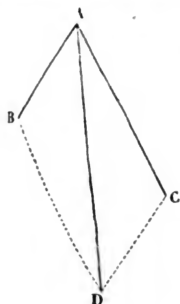


Fig. 5.

Réciproquement AD étant une force donnée, il sera toujours possible de lui substituer deux forces dans des directions quelconques différentes AB, AC, comprenant AD dans leur plan. Il suffit de mener par le point D deux droites DC, DB parallèles à ces directions AB, AC, et les longueurs mêmes AB, AC mesurent les forces en question, qu'on appelle les *composantes* de AD.

On appelle point fixe un point qui ne peut recevoir de la part d'une force, quelque grande qu'elle soit, aucun déplacement *appréciable*. L'effet de la force agissant sur un point fixe n'est plus alors un mouvement, mais une pression sur l'obstacle.

Lorsqu'une force agit sur un point, mobile il est vrai, mais lié invariablement à un point fixe, s'il arrive que la direction de la force soit celle de la droite qui passe par les deux points, alors son effet est détruit, comme mouvement bien entendu; car elle produit encore une tension

ou une pression sur l'obstacle matériel qui lie les deux points.

Maintenant, quand plusieurs forces agissent simultanément sur un même corps, il peut arriver aussi que le corps reste en repos. Il suffirait évidemment pour cela que l'une des forces du système fût égale et opposée en direction à la résultante de toutes les autres. Ce cas particulier du repos, produit sous l'influence de forces dont les effets se neutralisent, s'appelle l'*équilibre*.

Nous bornerons là ces notions sur les forces; elles nous suffiront pour l'intelligence des premiers phénomènes de mouvement que nous aurons à étudier.

État des corps. — L'étude que nous venons de faire des propriétés générales des corps nous a prouvé que les corps, sous quelque état qu'ils se présentent, sont composés de petites parties (*particules* ou *molécules*) tenues à distance les unes des autres, susceptibles de se rapprocher ou de s'éloigner. Les liaisons qui existent entre ces molécules sont plus ou moins intimes. Ainsi dans un corps solide ces liaisons sont telles qu'on ne peut séparer les parties du corps sans un effort plus ou moins grand, et ces parties, une fois séparées, ne se rejoignent plus. Dans les liquides la division se fait sans effort, et si la cause divisante cesse d'agir, les parties se rapprochent et toute trace de la division disparaît. On est convenu d'appeler *cohésion* la force qui lie entre elles les molécules des corps solides. La cohésion est très-faible dans les liquides; elle n'est cependant pas tout à fait nulle, car on sait que si l'on plonge le doigt dans l'eau, on enlève, en le retirant, une goutte suspendue dont les molécules se tiennent les unes les autres par une véritable cohésion. Dans l'air, la vapeur d'eau, les fluides gazeux, non-seulement cette cohésion est nulle, mais elle est même remplacée par une force répulsive qui s'exerce constamment entre les particules du gaz, de telle sorte que quelque grand que soit l'espace qu'on lui fournit, il le remplit toujours tout entier.

Posons sur la platine de la machine pneumatique une

vessie fermée et contenant une petite quantité d'air, elle est flasque et ne présente qu'un petit volume. Recouvrons-la maintenant d'une cloche, et par le jeu de la machine, enlevons de cette cloche l'air qui entoure la vessie : immédiatement nous voyons celle-ci se gonfler, s'étendre et remplir, si ses dimensions le lui permettent, tout le volume de la cloche.

Ainsi, dans les corps solides, cohésion, fixité des positions relatives des particules.

Dans les corps liquides, cohésion très-faible, mobilité très-grande des parties.

Dans les gaz, absence complète de cohésion; les molécules se repoussent mutuellement.

Il résulte de là que :

Un corps solide a une forme et un volume déterminés.

Un corps liquide a un volume déterminé, mais point de forme propre; sa forme est celle du vase qui le contient.

Enfin, un gaz n'a ni volume ni forme déterminés. Il a la forme et le volume de l'espace qui le renferme.

CHAPITRE II.

PESANTEUR. — POIDS. — CENTRE DE GRAVITÉ. PENDULE.

Lorsqu'on abandonne à elle-même une pierre que l'on tenait à la main, on la voit descendre vers la terre, *tomber*, comme on dit dans le langage vulgaire. Ce phénomène se manifeste le même en tous les points de la terre, à toutes les hauteurs au-dessus du sol, à toutes les profondeurs au-dessous de la surface terrestre, et avec tous les corps. Les exceptions que nous présentent la fumée, les ballons, les bulles de savon remplies d'hydrogène ne sont qu'apparentes; nous verrons plus tard qu'elles s'expliquent aussi par l'action de la même cause. On appelle *pesanteur* la force qui attire les corps vers le centre de la terre. Je dis vers le centre de la terre, car si, pour un observateur placé à la surface du sol, la pierre tombe vers la surface, de haut en bas, pour un observateur placé au fonds d'un puits de mine, la pierre tombe encore de haut en bas, mais en s'éloignant de la surface et se dirigeant vers le centre de la terre.

Lorsqu'un corps est soumis à l'action d'une force, cette force n'agit habituellement que sur un seul point du corps. (Exemples : pierre tirée par un cordon, bille lancée sur un billard par le choc de la queue.) La pesanteur se comporte tout différemment. Elle agit à la fois sur tous les points matériels dont se compose le corps.

Prenons une pierre, un morceau de craie, et après l'avoir brisée, laissons les fragments au contact; leur situation, par rapport à la terre, n'a pas changé; or, si la pesanteur n'agissait que sur un point du corps, ce point se trouvant dans un des fragments, il en résulterait que lorsqu'on lâcherait les deux morceaux, l'un

devrait tomber et l'autre demeurer en place. Mais ils tombent tous les deux, et, dût-on partager le corps en un million de fragments, tous tomberaient; donc la pesanteur agit sur toutes les molécules du corps.

D'ailleurs, prenons dix morceaux de plomb à côté les uns des autres; tous sont soumis à l'action de la pesanteur, et si on les lâche, ils tombent tous les dix; ils tomberaient encore si on les attachait les uns aux autres. Leur nombre et leur dimension ne feront rien au phénomène. Or, ils sont précisément, par le fait de ces liaisons, dans les mêmes conditions que les molécules d'un corps; nous devons donc admettre que toutes les molécules d'un corps sont pesantes.

Fil à plomb (fig. 6). — Pour connaître maintenant la direction de la pesanteur, suspendons une balle de plomb au bout d'un fil, puis, tenant le fil par l'autre extrémité, laissons tomber le plomb, nous verrons le fil se tendre, osciller, puis s'arrêter dans une position fixe. C'est ainsi que quand nous tirons sur une baguette ou une corde fixée par un point, nous les voyons se tendre ou se diriger dans le sens de la traction, et rester immobiles seulement lorsqu'ils sont précisément sur le prolongement rectiligne de cette traction.



Fig. 6.

Si le fil est dans la direction de la pesanteur, la force agissant dans la direction du point fixé est détruite. — Si la direction de la pesanteur ne coïncide pas avec celle du fil AM, on peut alors (fig. 7) décomposer la force MG suivant deux directions : MC prolongement du fil AM, et MH perpendiculaire au fil et dans le plan AMG. — La première composante est détruite par la résistance du fil; la seconde, au contraire, aura pour effet d'entraîner le point M dans la direction MH tangente à la circonférence qui a AM pour rayon. — Dire que le point M se meut, c'est dire qu'il n'y a pas équi-

libre. Ainsi, quand la direction de la pesanteur coïncide avec celle du fil, il y a équilibre; quand elles ne coïncident pas, l'équilibre n'a pas lieu ; donc la direction du fil en équilibre est celle de la pesanteur.



Fig. 7.

Quand le fil tiré par le plomb sera devenu immobile, sa direction sera donc celle de la pesanteur. Cette direction du fil à plomb est ce qu'on appelle la *verticale;* elle coïncide sensiblement avec la direction du rayon terrestre. La coïncidence serait rigoureuse si la terre était tout à fait sphérique et si elle n'avait pas son mouvement de rotation diurne. Nous verrons plus tard que la pesanteur est perpendiculaire à la surface de l'eau contenue dans un vase, lorsque cette eau est tranquille.

Pour des points très-rapprochés, les directions de la pesanteur, tendant ves le centre de la terre, peuvent être considérées comme parallèles. On sait que l'on appelle parallèles des droites qui, situées dans un même plan, ne se rencontrent pas à quelque distance qu'on les prolonge. Mais si elles ne se rencontrent qu'à une distance aussi prodigieusement grande que le rayon de la terre, étant d'ailleurs peu éloignées l'une de l'autre, il nous est impossible de les distinguer de droites qui seraient rigoureusement parallèles, c'est-à-dire qui ne se rencontreraient pas du tout. Il n'en est plus de même si nous prenons sur la surface de la terre deux points notablement éloignés l'un de l'autre, comme Paris et Orléans; leurs verticales sont loin d'être parallèles et font entre elles un angle très-appréciable et de plus d'un degré.

Nous admettrons, d'après cela, que les directions de la pesanteur, pour tous les points d'un même corps sont parallèles, et comme toutes les molécules d'un corps homogène sont identiques entre elles, nous admettrons aussi que la pesanteur agit également sur toutes.

Lois de la chute. — Après avoir ainsi successivement établi que la pesanteur agit sur tous les points d'un corps, et caractérisé sa direction par celle du fil à plomb au repos, occupons-nous de déterminer son mode d'action sur les corps et la nature du mouvement qu'elle leur communique.

Supposons deux locomotives placées sur deux rails parallèles, et chauffées toutes les deux de manière à parcourir le même nombre de mètres dans le même temps; il est de toute évidence que si on les fait partir simultanément, elles marcheront côte à côte, sans que le mouvement de chacune d'elles soit influencé le moins du monde par le voisinage de l'autre; et si on les lie l'une à l'autre, cette liaison restera tout à fait indifférente et ne changera rien aux conditions de leur mouvement.

C'est ce qui arrive précisément pour les molécules d'un corps homogène. Chacune d'elles obéit séparément à l'action de la pesanteur, qui est la même pour toutes. Les liaisons qui les unissent sont sans influence sur leur mouvement; une molécule de plomb tombe exactement comme cent mille molécules. C'est ce que l'on exprime en disant que la vitesse du mouvement est indépendante de la *masse*, en appelant masse la somme des molécules, la quantité de matière contenue dans le corps.

Nous avons admis que la pesanteur agissait de la même manière sur toutes les molécules d'un même corps. En sera-t-il de même quand il s'agira de molécules de nature différente? Une molécule de plomb tombera-t-elle comme une molécule de liége? Ici nous ne pouvons pas décider la question *à priori;* c'est évidemment à l'expérience à prononcer. Nous n'avons pas à nous préoccuper des moyens de faire l'expérience sur une molécule de plomb et sur une molécule de liége, puisqu'une masse quelconque de plomb tombe comme une seule de ses molécules, et de même pour le liége; nous n'aurons qu'à prendre des masses quelconques de ces deux corps et à les laisser tomber.

Or, si nous procédons ainsi, nous trouvons qu'une balle de plomb, un morceau de liége, une plume que nous

laissons tomber en même temps d'une hauteur de deux ou trois mètres, mettent des temps bien différents pour arriver à terre. Le plomb arrive le premier, puis le liége, puis, bien après lui, la plume.

Devons-nous en conclure tout de suite que l'action de la pesanteur varie avec la nature de la substance? La conclusion serait prématurée, car il peut se faire que ces différences de mouvement tiennent à des circonstances étrangères, à des causes retardatrices qui agissent inégalement sur les corps mis en expérience. Et, en effet, quand nous laissons tomber une feuille de papier étendue horizontalement dans toute sa largeur, elle tombe très-lentement et d'un mouvement fort irrégulier. Si au contraire nous la roulons en boule serrée, ou si nous nous arrangeons de manière qu'elle présente sa tranche à l'air, alors elle tombe incomparablement plus vite. Il ne faut pas beaucoup de réflexion pour arriver à deviner que c'est l'air qui modifie le mouvement, et que ce fluide oppose une résistance semblable à celle que l'eau offre au mouvement d'une rame que l'on présente par le plat.


Fig. 8.

Puisque l'air modifie évidemment le mouvement des corps qui tombent, nous n'arriverons à trancher la question qui nous occupe qu'en faisant tomber le plomb, le liége et la plume dans le vide.

Nous prendrons, pour cela, un long tube de cristal de 2 à 3 mètres (fig. 8); l'une des deux montures en cuivre qui le ferment à ses extrémités est munie d'un robinet que l'on peut visser sur la platine de la machine pneumatique. Ce tube contient différents corps, plomb, étain, bois, plume, moelle de sureau, etc. On commence d'abord par constater les différences de chute. Puis, par la manœuvre des pistons, on retire l'air du tube, on fait le vide. Si alors on détache le tube de la machine après avoir fermé son robinet, et si on le ren-

verse à plusieurs reprises, on voit que tous ces corps tombent en même temps; si on laisse rentrer un peu d'air, les différences reparaissent, d'autant plus prononcées, que la quantité d'air rentré est plus considérable. Le doute n'est plus permis après une expérience aussi décisive : *la pesanteur agit également sur toute espèce de matière.* Elle agit sur une molécule de plomb comme sur une molécule de liége; et le mouvement qu'elle communiquera à une masse de cent molécules de liége est le même que celui qu'elle donnera à une masse de cinquante, de cent, de mille molécules de plomb, puisque le nombre de molécules ne fait rien au mouvement donné par cette force.

Quel est ce mouvement? Et d'abord examinons de quelle manière un mouvement rectiligne peut différer d'un autre mouvement rectiligne.

Si un mobile parcourt des espaces égaux dans des temps égaux, quelle que soit la valeur donnée à ces temps, de telle sorte que les espaces parcourus en dix secondes, en cent secondes, soient dix fois, cent fois, l'espace parcouru en une seconde, alors le mouvement est appelé *mouvement uniforme.* Si les espaces ne sont pas proportionnels aux temps, ce qui suppose que les espaces parcourus dans des temps égaux successifs vont en croissant ou en décroissant, alors le mouvement est dit *mouvement varié.* A laquelle de ces deux espèces de mouvement rapporterons-nous le mouvement des corps qui tombent? Voici une expérience qui nous permettra de décider la question.

Laissons tomber sur une table, d'une très-petite hauteur, un morceau de craie, il demeure intact; puis, faisons-le tomber d'une hauteur d'un mètre, il se brise. Le choc a donc été plus violent dans le second cas que dans le premier, quoique produit par le même corps. Il faut donc admettre que le morceau de craie allait plus vite au moment où il a rencontré la table dans la seconde expérience, que lorsqu'il l'a heurtée dans la première. Nous savons, en effet, que le choc produit par un même corps est d'autant

plus violent que son mouvement est plus rapide. Donc, le mouvement d'un corps qui tombe va en s'accélérant.

Par des méthodes expérimentales exposées dans les cours de mécanique, on établit qu'un corps qui tombe sous l'action de la pesanteur seule, parcourt dans la première seconde de son mouvement, $4^m,9$ environ.

Que dans les deux premières secondes il parcourt 4 fois cet espace;

Dans les trois premières, il parcourt 9 fois $4^m,9$;

Dans les quatre premières, il parcourt 16 fois $4^m,9$, et ainsi de suite;

D'une manière générale : que l'espace parcouru dans un certain nombre de secondes est égal à $4^m,9$, multiplié par le carré arithmétique du nombre de secondes.

Pour faire comprendre le parti qu'on peut tirer de la connaissance de cette loi, supposons qu'on laisse tomber une pierre du haut d'une tour, et que la pierre mette six secondes à arriver en bas, on en conclura que la tour a pour hauteur $4^m,9 \times 6 \times 6$.

$$\begin{array}{r} 4{,}9 \\ 36 \\ \hline 294 \\ 147 \\ \hline 176{,}4 \end{array}$$

Hauteur : 176 mètres 4 décimètres.

Dans le mouvement uniforme l'espace parcouru en une seconde est le même à toutes les époques du mouvement; il mesure ce que l'on appelle la *vitesse* du mobile. L'unité de vitesse serait celle d'un mobile qui parcourrait un mètre par seconde.

Dans le mouvement varié, la vitesse est au contraire incessamment variable, soit croissante, soit décroissante, suivant que le mouvement est accéléré ou retardé. — Quant on parle de la vitesse dans un pareil mouvement, il faut entendre la vitesse à tel ou tel instant déterminé. — Pour ne la point confondre avec la vitesse constante du mouvement uniforme, on lui donne le nom de *vitesse acquise*.

Le mouvement accéléré ou retardé ne peut provenir évidem-

ment que de l'effet d'une force qui agit sans interruption sur le mobile. — Car si elle cessait d'agir pendant un certain temps, le corps, ne pouvant rien changer de lui-même à l'impulsion reçue, continuerait pendant ce temps sa marche avec un mouvement uniforme.

Si la force est constante d'intensité, elle ajoute sans cesse à la vitesse du mobile des accroissements égaux, de sorte que cette vitesse croît proportionnellement au temps. Pour se bien rendre compte de ce que c'est que la vitesse à un moment donné, il faut supposer qu'à partir de ce moment la force accélératrice cesse d'agir, et alors la vitesse du mouvement uniforme que prendrait le mobile, vitesse mesurée par l'espace que le mobile parcourrait alors dans l'unité du temps, serait précisément la vitesse acquise demandée.

On démontre en mécanique que si la vitesse croît proportionnellement au temps, les espaces parcourus croissent proportionnellement aux carrés du temps; et réciproquement. — Le mouvement des corps pesants est donc soumis à ces deux lois, c'est ce que l'on appelle un mouvement *uniformément varié;* la pesanteur est une force accélératrice constante. On lui donne pour mesure la vitesse acquise à la fin de la première seconde du mouvement; cette vitesse est $9^m,8$: double de l'espace parcouru dans la première seconde.

Dans le petit problème donné plus haut, la vitesse acquise par le mobile au bas de la tour serait $9,8 \times 6 = 58^m,8$. — Ainsi, si au bout de six secondes la pesanteur venait à cesser d'agir, le mobile continuerait son mouvement, devenu alors uniforme, avec une vitesse de $58^m,8$ par seconde.

Poids. — Lorsqu'un corps est posé sur une table horizontale ou sur la main, il exerce sur cet obstacle une pression proportionnelle évidemment au nombre de molécules qui composent le corps. Cette pression est ce que l'on appelle le *poids* du corps. Si le corps était suspendu à une corde, le poids produirait une traction au lieu d'une pression; mais, quoique l'effet ait changé de nature, la force est cependant encore la même.

Centre de gravité. — Nous allons montrer que cette force peut remplacer à elle seule le système de toutes les petites forces égales, qui agissent sur les points matériels dont se compose le corps.

Prenons une petite règle en bois et suspendons-la par son milieu, de manière qu'elle se tienne horizontale, à un petit ruban de caoutchouc ou à un ressort en tire-bouchon ; maintenant à un crochet fixé au milieu de la règle sous le point d'attache du caoutchouc suspendons une balle de plomb, et notons de combien le caoutchouc s'est allongé (fig. 9) ; retirons ensuite la balle. Si la charge n'a pas été trop forte, le caoutchouc, en vertu de son élasticité, reviendra à sa première longueur. Suspendons à la même place une seconde balle qui allonge le ressort exactement de la même quantité. Nous pourrons évidemment regarder ces deux balles comme ayant le même poids, puisque agissant dans les mêmes conditions et par leur poids elles produisent le même effet.

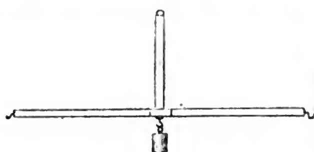


Fig. 9.

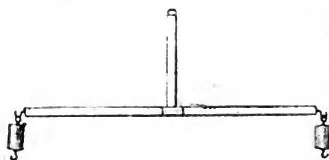


Fig. 10.

L'égalité de ces poids constatée, accrochons-les simultanément aux deux extrémités de la règle (fig. 10), et notons encore de combien s'allonge le caoutchouc. Si maintenant nous enlevons les deux balles et si nous les accrochons ensemble, et l'une sous l'autre, au point milieu (fig. 11), nous verrons le caoutchouc s'allonger de la même quantité. De plus, cet allongement est juste le double de celui que donnait chacune des balles accrochées isolément au même point. Donc, deux forces parallèles et égales, agissant sur deux points liés invariablement entre eux, peuvent être remplacées par une seule force égale à leur somme et par conséquent double de chacune d'elles,

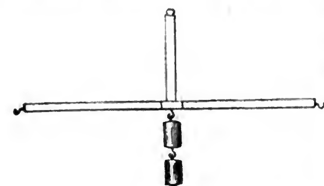


Fig. 11.

appliquée au milieu de la distance de leurs propres points d'application.

Prenons à présent un corps quelconque (fig. 12). Si nous considérons deux molécules A et B de sa masse, elles sont sollicitées par des forces parallèles et égales, les actions de la pesanteur; nous pouvons donc les remplacer par une seule force double appliquée au point milieu de leur distance. En prenant ainsi tous les points du corps deux à deux, nous pourrons substituer au système réel des points du corps un système de points en nombre moitié, mais pesant chacun deux fois autant que chacune des molécules du corps. Si nous continuons de la même manière pour ce nouveau système de points, nous voyons que nous pourrons arriver à substituer au corps tout entier deux points pesants, puis un seul point, pesant autant que l'ensemble de toutes les molécules. Ce point, nous l'appellerons le *centre de gravité* du corps ; et la force qui lui est appliquée et qui est la somme des actions de la pesanteur sur toutes les molécules de la masse est précisément la même chose que ce que nous avons déjà nommé le *poids*.

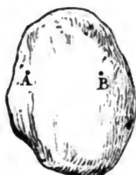


Fig. 12.

Nous pourrons donc à volonté, et suivant que les besoins de la démonstration l'exigeront, supposer, ce qui est réellement, tous les points du corps pesant, ou admettre un seul point pesant, le centre de gravité, pourvu que nous n'oubliions pas que ce point doit peser à lui seul autant que toutes les molécules du corps. C'est ce que l'on exprime quelquefois en disant que l'on considère la masse pesante du corps comme concentrée au centre de gravité.

Ce centre de gravité peut très-bien ne pas coïncider avec une des molécules du corps; il peut n'être qu'un simple point géométrique et idéal, mais il faut le considérer comme un point matériel lié invariablement aux molécules du corps. Cette condition d'une liaison invariable pourra sembler contradictoire avec la nature des liquides ou des gaz. Mais nous ferons remarquer que *quand une masse fluide est en repos*, on peut, d'après ce

qui a été dit quelques pages plus haut, supposer l'existence de ces liaisons sans rien changer au mode d'action de la pesanteur sur les molécules ; et alors l'hypothèse s'admettra sans difficulté.

La position du centre de gravité par rapport aux points matériels du corps ne dépend que de la disposition relative des molécules, mais nullement de la position du corps lui-même.

Équilibre des corps pesants. — Si un corps solide a son centre de gravité fixe, de quelque manière que ce résultat soit obtenu, le corps sera en équilibre dans toutes les positions qu'on pourra lui donner autour de son centre de gravité, puisque nous pouvons supposer toutes les actions de la pesanteur sur ses molécules remplacées par le poids appliqué au centre de gravité, et que le centre de gravité est fixe.

Mais nous savons qu'il n'est pas nécessaire de fixer un corps par son centre de gravité même, pour qu'il prenne une position d'équilibre. Un corps suspendu par un de ses points, n'importe lequel, s'arrête toujours à *une certaine* position d'équilibre. Ici il n'y a équilibre que dans une position donnée, tandis que précédemment, lorsque le centre de gravité même était fixé, l'équilibre avait lieu dans toutes les positions possibles. Il y a donc une différence marquée entre ces deux cas.

Quelle est actuellement la condition à remplir pour qu'il y ait équilibre ? Elle est facile à trouver : soit A le point de suspension ; G le centre de gravité (fig. 13), si nous supposons toutes les actions de la pesanteur réunies au point G, comme nous sommes convenus de le faire, alors le corps sera un véritable fil à plomb dont G sera la masse pesante liée au point A par le système invariable des molécules matérielles du corps, système qui remplace le fil. Or, nous savons que la position d'équilibre du fil à plomb est la ligne verticale : donc pour qu'il y ait équilibre il faut, et il suffit, que le centre de gravité et le point de suspension soient sur une même ligne verticale.

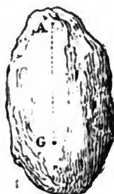


Fig. 13.

Remarquons que ces deux points peuvent être, l'un par rapport à l'autre, dans deux positions très-différentes : G au-dessous de A comme dans le fil à plomb, et G au-dessus de A, comme lorsqu'un bateleur tient une chaise en équilibre sur son doigt. Dans ce second cas, l'équilibre est possible puisque la force agit encore dans la direction du point fixe ; mais il y a une très-grande différence entre ces deux cas d'équilibre. Lorsque le corps est dans la première position, le centre de gravité est le plus bas possible, et si on dérange le corps, on éloigne nécessairement le centre de gravité, qui se relève, du centre de la terre : alors la pesanteur le rappelle à sa position d'équilibre. Si, au contraire, on parvient à donner au corps la seconde position, le centre de gravité est dans ce cas le plus haut possible, et comme par l'action de la pesanteur il tend toujours à descendre, pour peu que le corps soit dérangé de sa position d'équilibre, et que le centre soit écarté de la verticale, le corps continue à tourner autour de son point de suspension jusqu'à ce que le point G soit venu se placer au-dessous du point A.

On emploie l'expression *d'équilibre stable* pour désigner la première position d'équilibre ; et l'on applique à la seconde le nom *d'équilibre instable.*

La géométrie donne, dans un petit nombre de cas simples, le moyen de déterminer le centre de gravité. Ainsi elle démontre : que dans une sphère homogène, c'est-à-dire qui conserve la même densité en tous les points de sa masse, le centre de gravité est au centre de figure ; que dans un cube, ce centre est au point de rencontre des diagonales ; dans un cylindre droit, au milieu de la droite qui joint les centres des bases ; dans un triangle, aux deux tiers de la ligne qui joint un sommet quelconque au milieu du côté opposé ; dans un cercle, au centre ; dans un anneau, au centre de l'anneau, etc. Mais le nombre de cas où la géométrie est impuissante à donner sous une forme simple la position du centre de gravité, soit à cause de l'irrégularité de la forme, soit à cause du défaut d'homogénéité, est tellement grand, qu'il y a pres-

que toujours nécessité absolue de recourir à une méthode expérimentale. Les principes que nous venons de poser tout à l'heure nous fournissent la méthode suivante, qui est loin cependant d'être toujours praticable.

Suspendons le corps par un de ses points, et quand il sera en équilibre, menons, si cela est possible, la verticale qui passe par le point de suspension ; le centre de gravité doit être sur cette droite. Prenons maintenant en dehors de cette ligne un second point du corps, et suspendons-le par ce point. Quand le corps aura pris sa nouvelle position d'équilibre, menons la verticale du point actuel de suspension ; le centre de gravité sera aussi sur cette droite ; et comme le corps a nécessairement un centre de gravité, les deux droites se rencontreront et leur point de rencontre sera le centre cherché.

Si un corps, au lieu d'être suspendu, était posé sur un plan horizontal et le touchait par un de ses points, il faudrait, pour qu'il y eût équilibre, que le centre de gravité fût sur la ligne verticale qui passe par le point d'appui. La stabilité de l'équilibre dépendra ici de la forme du corps dans la partie qui touche le plan. Si le déplacement que l'on donne au corps dans une direction quelconque a pour effet d'éloigner de la table le centre de gravité, le corps reviendra de lui-même à sa première position, puisque le centre de gravité doit toujours être le plus bas possible, et l'équilibre sera stable. Si, au contraire, le déplacement fait descendre le centre de gravité, alors le mouvement continue dans ce sens, et le corps s'éloigne de plus en plus de sa première position ; l'équilibre est instable. C'est ce qui explique qu'il soit impossible de faire tenir un œuf debout sur son grand axe ; tandis qu'il se tient très-bien en équilibre quand ce grand axe est couché.

Quand le corps repose sur le plan par plusieurs points, il suffit, pour qu'il y ait équilibre, que la verticale abaissée du centre de gravité rencontre le plan dans l'intérieur du polygone convexe le plus simple qui prendrait les points d'appui pour sommets. Ce polygone est ce que l'on

appelle *base de sustentation*. Ainsi lorsqu'une table pose à terre, sa base de sustentation est le quadrilatère qui a pour sommets les points où ses quatre pieds touchent le sol. Pour l'homme la base de sustentation est formée par le quadrilatère passant par les deux talons et les bouts des deux pieds (fig. 14). Plus la base de sustentation sera étroite et plus évidemment l'équilibre sera difficile à maintenir. Aussi est-il presque impossible de se tenir debout avec les pieds placés sur une même ligne droite, soit comme l'indigne la figure 15, soit comme le représente la figure 16.

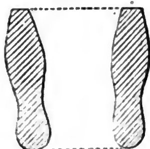


Fig. 14.



Fig. 15.



Fig. 16.

Lorsqu'un homme porte un fardeau un peu lourd, le poids de cette masse additionnelle déplace sensiblement le centre de gravité de l'ensemble; aussi l'homme se penche-t-il du côté opposé à celui où le poids est appliqué. Ainsi il se penchera en avant s'il a sur le dos une hotte chargée; en arrière, s'il a devant lui un éventaire; à droite, s'il porte un seau d'eau à la main gauche (fig. 17), au besoin même, il écartera le bras du côté droit pour ramener plus sûrement encore le centre de gravité au-dessus de la base de sustentation; et, s'il est chargé sur le dos, il prendra une canne afin d'avoir un point d'appui de plus et d'élargir d'autant sa base de sustentation.



Fig. 17.

Lorsqu'une voiture roule sur la chaussée d'une route, le centre de gravité reste toujours compris dans le polygone formé par les points d'appui des roues; mais si cette voiture quitte la chaussée pour les bas côtés (fig. 18), et que le dos d'âne soit très-prononcé, alors, pour peu que la voiture soit montée haut sur ses roues, que sa voie soit étroite et que sa charge soit surtout à la partie supérieure, sur l'impériale, elle versera infailliblement, parce que son centre de gravité sortira de la base de sustentation.



Fig. 18.

Remarquons bien que ce que nous disons là ne s'applique qu'aux corps posés sur des plans, et non point à des corps qui, comme la tour penchée de Pise ou de Bologne, ont une partie de leur masse engagée dans une masse fixe. Là, la solidité de l'édifice tient à la cohésion des matériaux. Si la voiture dont nous parlions tout à l'heure, toute penchée qu'elle puisse être, avait ses roues engagées jusqu'au moyeu dans des ornières profondes, étroites, et creusées dans une terre bien résistante, cette voiture ne tomberait évidemment pas.

Nous terminerons ce long chapitre sur le centre de gravité en montrant que quelquefois, par l'action de la pesanteur, un corps peut se trouver remonter un plan incliné au lieu de le descendre.

Prenons un disque en bois dans l'épaisseur duquel se trouve logée une forte masse de plomb, placée en dehors du centre, en G par exemple, le centre de gravité se trouvera évidemment du côté de ce morceau de plomb : soit précisément G sa position. Plaçons ce disque debout sur sa tranche, le point G en haut et rejeté un peu de côté, en appuyant le disque sur un plan incliné, comme l'indique la figure 19. En faisant rouler avec la main le

disque sur le plan, on amènera le rayon OA, qui passe par le centre de gravité dans la position O'A', et le centre de gravité se trouvera avoir descendu de G en G'. Si maintenant nous replaçons le disque dans sa première position, et si nous l'abandonnons à lui-même, il devra nécessairement exécuter ce même mouvement, puisque nous pouvons considérer le poids du corps appliqué en G. Ce point G, tendant à descendre, devra marcher vers G', et cette chute du poids, de G en G', fera monter le disque le long du plan. Il serait facile de voir que si le point G avait été rejeté hors de la verticale dans l'autre sens, le disque serait descendu, mais seulement jusqu'à ce que le point G fût au point le plus bas de la ligne courbe qu'il décrit dans le mouvement de descente du disque, et que l'on appelle en géométrie une cycloïde.

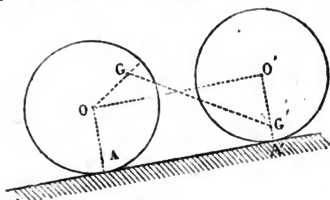


Fig. 19.

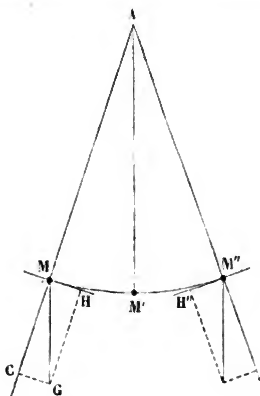


Fig. 20.

Mouvement pendulaire. — Nous avons dit que lorsque le fil à plomb n'était pas dans la direction de la pesanteur, qui est la direction verticale, on pouvait appliquer à la force une décomposition qui permettait de la remplacer par deux autres forces : l'une agissant sur le prolongement du fil MC (fig. 20), et qui produit et mesure sa tension ; l'autre MH dans le plan vertical AMG ou MAM', et qui a seule son effet.

La pesanteur entraînant par cette composante MH, le mobile dans le plan MAM', il s'ensuit qu'il n'y a pas de raison pour que

le mobile sorte de ce plan ; il décrira donc une courbe plane dont tous les points seront à une distance du point A, constamment égale à la longueur du fil AM ; cette courbe est par conséquent un arc de circonférence. Tant que AM ne sera pas devenu vertical, il y aura toujours une composante MH tangente à la circonférence, et dont l'effet sera d'augmenter de plus en en plus la vitesse du mouvement, puisque les impulsions seront toujours dans le sens de ce mouvement. Seulement la valeur de ces impulsions est évidemment variable, car il est clair qu'au fur et à mesure que l'angle MAM' diminue, HMG qui est son complémentaire, augmente, et la longueur HM est de plus en plus petite.

C'est donc lorsque le mobile arrivera en M', sur la verticale. que sa vitesse acquise sera la plus grande possible; il devra dès lors remonter sur la portion d'arc qui fait suite à MM'. Or, si nous prenons le fil à plomb dans une position AM", symétrique de AM, la décomposition de la pesanteur donnera une composante M"H" exactement égale à MH, mais dirigée en sens inverse du mouvement; par conséquent tendant à le retarder de la même quantité dont MH l'accélérait.

Il suit de là que, pour que le mouvement puisse s'éteindre sur la seconde portion de l'arc, il faut que le mobile passe par toutes les positions symétriques de celles qu'il a occupées sur la première portion. Il s'arrêtera donc quand il sera arrivé à la position symétrique de son point de départ : puis il retombera vers AM' prenant le même mouvement en sens inverse, et remontera à son point de départ, et ainsi de suite indéfiniment ; du moins, c'est ainsi que les choses se passeraient dans le vide. Dans l'air, la résistance du milieu contribue, avec la pesanteur, à diminuer l'étendue du mouvement ascendant, et empêche le mobile d'arriver à la hauteur de son point de départ, de sorte que le mobile restreignant de plus en plus l'étendue de sa course, sur l'arc de circonférence qu'il parcourt, finit par retomber au repos.

Loi de l'isochronisme.— On donne le nom de *pendule* à tout corps pesant exécutant autour d'un point de suspension, ou plutôt d'un axe de suspension horizontal, le mouvement que nous venons de décrire et que l'on appelle mouvement *oscillatoire ;* l'*oscillation*, c'est l'angle formé par le pendule dans deux positions extrêmes consécutives, à droite et à gauche de la verticale. Dans le vide, elles seraient toutes égales ; dans l'air, elles sont décroissantes de grandeur.

Mais, quelle que soit leur grandeur, elles sont toutes d'égale

durée, dans l'air comme dans le vide, pour un même pendule, pourvu que l'angle initial d'écart ne dépasse pas 4 à 5°. Cette loi remarquable, découverte par Galilée, et appelée loi de l'*isochronisme*, se vérifie ainsi par l'expérience :

On suspend à un fil de 1 mètre de long une bille d'ivoire : puis, donnant au pendule un angle d'écart de 5° environ, on l'abandonne à lui-même. Dans un air calme, il pourra osciller pendant plus d'une heure : on compte alors le nombre d'oscillations exécutées pendant trois minutes; puis, au bout de quelques instants, on recommence l'observation, et l'on peut constater qu'à toutes les époques du mouvement, même lorsque les oscillations sont devenues à peine appréciables en grandeur, le nombre d'oscillations accomplies dans cet intervalle de trois minutes est toujours exactement le même; d'où résulte l'égalité de durée des oscillations.

Cette durée change d'ailleurs avec la longueur du pendule et grandit avec elle, mais non dans la même proportion : ainsi, pour un pendule quatre fois, neuf fois, seize fois plus long, la durée de l'oscillation serait deux fois, trois fois, quatre fois plus longue; elle est proportionnelle à la racine carrée de la longueur du pendule.

Pour vérifier cette loi on suspendra à côté l'un de l'autre deux pendules à balles d'ivoire, l'un dont le fil aura, je suppose, $0^m,30$: l'autre dont le fil aura $0^m,30 \times 9$ ou $2^m,70$; on les écartera de leur position d'équilibre, et si on les laisse partir en même temps, on verra que le premier fait trois oscillations pendant que le second n'en fait qu'une.

Enfin la durée de l'oscillation dépend de l'intensité de la pesanteur.

Toutes ces lois sont comprises dans la formule :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad \pi = 3,14159...$$

dont le calcul donne la démonstration pour le cas d'oscillations très-petites, et quand l'écart ne dépasse pas 4° ou 5°. Dans cette formule t exprime un nombre de secondes; l la distance en mètres du point de suspension au centre de la boule, et g la vitesse acquise après la première seconde de sa chute par un corps qui tombe dans le vide ; à Paris $g = 9^m,8089$.

En appliquant cette formule aux observations pendulaires faites aux divers lieux de la terre, on a pu constater que la

pesanteur, mesurée par le facteur g, va en diminuant à mesure que l'on se rapproche de l'équateur, en augmentant quand on va vers le pôle; et qu'elle diminue quand on s'élève verticalement au-dessus du sol.

Application du pendule aux horloges.— Le balancier adapté aux horloges n'est autre chose qu'un pendule dont le rôle est de régulariser le mouvement et d'empêcher son accélération.

Nous prendrons pour exemple les grandes horloges publiques, où le mouvement est ordinairement donné par un poids suspendu à une corde enroulée sur un cylindre, dont la tête, armée d'un engrenage, communique le mouvement à tout le système. Le poids, en tombant, fait tourner le cylindre, et avec lui les roues et les aiguilles; seulement la chute du poids ayant lieu avec une vitesse croissante, la marche de l'horloge devrait être, non pas uniforme, mais accélérée. Le pendule est chargé d'empêcher cette accélération.

Ce pendule se compose d'une tige rigide supportant une lentille pesante en laiton, qui présente sa tranche à l'air. Cette tige est liée à une pièce en forme d'ancre, qui se meut avec elle. Les branches de cette ancre (fig. 21) portent deux petites pointes destinées à engrener, l'une après l'autre, dans le mouvement d'oscillation, avec les dents du cylindre, ou même de toute autre roue dentée du système. Supposons que l'on pousse le pendule vers la gauche; la dent de gauche se dégage ou *échappe*, pour employer le terme technique, et par suite, le cylindre devenant libre tourne, entraîné par le poids, mais bientôt la dent de droite va venir s'engager entre les dents et arrêter court le mouvement de rotation; puis le pendule, redescendant en sens contraire, le cylindre redeviendra libre et recommencera son mouvement. Par suite du mouvement de gauche à droite du pendule et vers la fin de ce mouvement, la dent de gauche s'engagera de nouveau pour échapper ensuite lorsque le pendule reviendra en sens contraire, et ainsi de suite indéfiniment. Le mouvement du cylindre se trouvant arrêté périodiquement et à intervalles de temps égaux par le pendule, sera rendu,

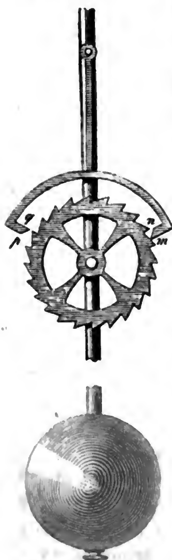


Fig. 21.

non pas uniforme, mais régulier. Il faut remarquer, en outre, que la forme des dents de l'ancre est telle, que lorsque la dent commence à échapper, elle se trouve recevoir sur sa petite surface inclinée *mn* ou *pq*, une certaine pression de la part de la dent du cylindre qui la touche, de telle sorte que le mouvement de l'horloge entretient et perpétue celui du pendule, en même temps que le mouvement du pendule régularise celui de l'horloge, jusqu'à ce que le poids soit arrivé au bas de sa course.

Dans une pendule d'appartement, l'impulsion est donnée par un ressort spiral tendu qui se détend; mais le rôle du pendule est exactement le même.

Enfin, dans les montres, le pendule est remplacé par un petit ressort spiral dont les oscillations sont isochrones également, quoique dues à une cause toute différente, et elles sont utilisées de la même manière à très-peu de chose près.

CHAPITRE III.

MESURE DES POIDS. — BALANCE.

Le poids est, comme nous l'avons dit dans le chapitre précédent, la résultante ou la somme des actions de la pesanteur sur toutes les molécules d'un corps. Il est important de remarquer que la pesanteur et le poids sont deux choses bien distinctes. La pesanteur est la force qui agit sur chaque molécule; elle ne dépend ni du nombre de ces molécules, c'est-à-dire de la masse, ni de la nature des substances; le poids est au contraire d'autant plus grand, que la masse est plus considérable; il lui est même évidemment proportionnel. On ne doit donc pas dire la pesanteur, mais le poids d'un corps.

Densité. — Poids spécifique. — Tous les corps pris sous le même volume sont loin d'avoir le même poids, par conséquent la même masse. Un décimètre cube d'eau pèse un kilogramme, et un décimètre cube de plomb pèse 11 kilogrammes. Ainsi, sous le même volume, le plomb pèse onze fois autant que l'eau; par suite aussi, sous le même volume, sa masse est onze fois aussi grande. Le nombre 11, pris comme rapport des masses, est ce que l'on appelle la *densité* du plomb; pris comme rapport des poids, c'est le *poids spécifique* du plomb. Ces deux expressions, densité et poids spécifique, sont souvent prises l'une pour l'autre, et nous ne ferons pas de différence entre elles; ou, si nous devons tenir compte de la différence d'acception, nous le mentionnerons spécialement.

Nous nous occuperons dans ce chapitre des moyens employés pour mesurer le poids d'un corps. D'une manière générale, mesurer une quantité d'une certaine nature, c'est chercher le rapport qui existe entre cette quantité et une autre quantité *de même nature*, prise comme terme de comparaison et que l'on appelle *unité*. Dans le

cas qui nous occupe, mesurer un poids, c'est chercher combien de fois ce poids contient un certain poids pris par convention comme unité.

L'unité de poids en France depuis 1790, c'est le *gramme*.

Le gramme est le poids d'un centimètre cube d'eau pure prise à la température de 4° au-dessus de 0°. Les multiples du gramme sont :

Le décagramme, qui vaut...	10 grammes.
L'hectogramme............	100
Le kilogramme............	1000
Le myriagramme (peu usité).	10000

Les divisions décimales du gramme sont :

Le décigramme, qui vaut la	10e partie du gramme.
Le centigramme.........	100e
Le milligramme.........	1000e

La comparaison des poids se fait à l'aide d'un instrument appelé *balance*.

Balance.—La balance se compose d'une tige métallique rigide, appelée *fléau*, symétrique par rapport à un plan, mené en son point milieu perpendiculairement à son axe de longueur, et qui comprend alors nécessairement le centre de gravité. Par ce mot de *symétrique* j'entends que tous les points de la figure et même de la masse sont disposés deux par deux, l'un à droite du plan, l'autre à gauche, à égale distance, et sur une même ligne perpendiculaire à ce plan. Les deux portions séparées par ce plan de symétrie s'appellent les *bras* (fig. 22).



Fig. 22.

Dans ce même plan et au-dessus du centre de gravité se trouve implanté un prisme en acier qui traverse perpen-

diculairement le fléau. Ce prisme repose par son arête inférieure sur deux petites surfaces planes et bien polies entre lesquelles passe le fléau (fig. 23). On l'appelle le *couteau*.

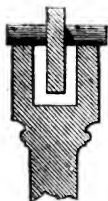


Fig. 23.

En A et en B, en ligne droite avec le bord du couteau, sont accrochés des plateaux parfaitement égaux. C'est dans ces plateaux que l'on mettra les poids que l'on veut comparer. Voyons maintenant comment cet appareil peut atteindre le but que nous nous proposons.

Pour plus de clarté dans la figure nous la réduirons à ses parties essentielles : les trois points de suspension A, O, B, en ligne droite, et le centre de gravité du fléau, G, situé sur la droite OG perpendiculaire à AB, et au-dessous du point O (fig. 24).

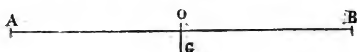


Fig. 24.

Si nous prenons d'abord le fléau AB tout seul, sans ses plateaux, il a pour position d'équilibre stable la ligne horizontale. Car nous savons qu'un corps suspendu par un de ses points n'est en équilibre que lorsque son centre de gravité est sur la ligne verticale qui passe par le point de suspension. OG doit donc être verticale, et alors AB qui lui est perpendiculaire est horizontale. Si avec le doigt on déplace un peu le fléau, OG écartée de la verticale y revient, puis dépasse la verticale de l'autre côté, y revient encore, et ainsi de suite. Ce mouvement d'oscillation est reproduit par la ligne AB, avec cette différence que OG oscille de part et d'autre de la verticale, tandis que AB oscille de part et d'autre de l'horizontale. Les frottements au point O éteignent petit à petit le mouvement, et au bout d'un certain temps, AB se trouve de nouveau arrêté dans la position horizontale.

Si maintenant nous accrochons en A et B des plateaux égaux, nous pouvons remplacer en pensée ces deux forces égales et parallèles par une force double ap-

pliquée au milieu de leur distance. Or, ce milieu est précisément le point fixe O. L'effet de ces deux forces est donc annulé par la résistance de ce point fixe. Il n'en résulte qu'un accroissement de pression sur les plans d'appui. Ainsi dans ce cas le fléau est encore en équilibre stable dans la position horizontale.

Mettons actuellement des poids égaux dans les plateaux. Ces deux forces égales pourront aussi être remplacées par une force double appliquée au point O; par conséquent les conditions de l'équilibre stable ne seront point modifiées. Cette position d'équilibre stable pour le fléau AB sera encore la ligne horizontale.

Nous supposons dans tout ceci que la charge de chaque plateau agit bien exactement dans la direction verticale de son point de suspension; condition qui sera remplie si la suspension en A et en B a une grande mobilité; car le corps suspendu au point A, tournant librement autour de ce point, se placera de lui-même de telle sorte que son centre de gravité soit dans la verticale qui passe par A.

Il ne nous reste plus à examiner que le cas où les plateaux A et B, égaux d'ailleurs, recevraient des charges inégales. Mettons un poids de 10 grammes dans le plateau A, et un poids de 12 grammes dans le plateau B. Décomposons ce poids 12 en 10 grammes + 2 grammes. Les dix grammes du plateau A et les 10 grammes du plateau B peuvent être remplacés par une charge de 20 grammes appliquée au point O, et qui produit simplement un accroissement de pression sur le plan d'appui; restent donc 2 grammes dans le plateau B qui vont faire pencher cette extrémité B en relevant l'extrémité A. Mais

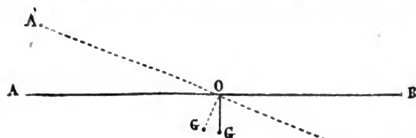


Fig. 25.

en même temps, le point G sort de la verticale et se porte en G′ (fig. 25). Le poids du fléau que nous pouvons supposer appliqué en G′ tendra donc à ramener le

point G vers la verticale, A′B′ vers l'horizontale, et par suite à équilibrer l'action de la force de 2 grammes qui agit en B. L'expérience montre, en effet, que ce mouvement d'inclinaison est limité et que le fléau s'arrête à une position d'équilibre *stable*, d'autant plus inclinée que l'excès de poids qui agit en B est plus considérable, et que le centre de gravité est plus rapproché du point de suspension. C'est surtout de cette dernière condition que dépend la *sensibilité* de l'instrument.

Ainsi, par la construction que nous avons donnée à la balance, l'égalité des poids est caractérisée par la position d'équilibre horizontale du fléau; l'inégalité des poids par la position d'équilibre inclinée, est d'autant plus inclinée que la différence des poids est plus grande.

A quoi reconnaîtrons-nous que ces conditions de construction sont bien remplies, que les plateaux sont égaux, que les bras du fléau sont de même longueur?

Quand la seconde condition est remplie, il est facile de reconnaître si les plateaux sont d'égal poids, puisque alors, en les accrochant au fléau horizontal, ce fléau doit conserver sa position d'équilibre, tandis que s'il existe une différence de poids entre les plateaux, le plus lourd fera pencher le fléau de son côté. On remédie aisément à cet inconvénient en ajoutant de petits corps pesants tels que des grains de plomb, ou de petites feuilles d'étain au plateau le plus léger.

Si les deux plateaux étaient égaux, il serait aussi très-aisé de reconnaître si les deux bras de levier sont de longueurs différentes. Supposons, en effet, que le point de suspension O ne soit pas au milieu de la distance AB, qu'il soit plus près du point A que du point B (fig. 26). Alors les deux forces égales, représentées par les poids des plateaux, pourront être remplacées par une force double de chacune d'elles et appliquée au point C milieu de AB; cette force aura évidemment pour effet de faire pencher le fléau et d'a-



Fig. 26.

baisser le point B; on reconnaîtra donc ainsi que le bras OB est le plus long.

Puisque la force appliquée en B fait pencher le fléau de son côté, cela prouve qu'elle est trop grande; alors, en la diminuant convenablement, on arrivera à faire équilibre à la force plus grande appliquée en A.

Nous pouvons conclure de là que si par hasard les deux plateaux étaient inégaux, et qu'on eût suspendu le plus léger des deux du côté du bras de fléau le plus long, il pourrait se faire qu'il y eût équilibre horizontal; et à coup sûr on pourra toujours l'établir en surchargeant le plateau qui se trouve trop élevé.

Ceci nous fournit un moyen de reconnaître si les bras sont égaux ou non, même quand on ne sait pas si les plateaux le sont ou ne le sont pas. On accrochera les deux plateaux, puis on établira l'équilibre horizontal en surchargeant le plateau qui paraît trop léger; si les bras sont égaux, les plateaux, charges comprises, sont aussi égaux nécessairement, et alors on peut les permuter sans que l'équilibre soit troublé. S'ils sont inégaux, les plateaux le sont aussi nécessairement, et le plus lourd sera du côté du bras le plus court; alors si on les change de place, on se trouvera mettre, au contraire, le plateau le plus lourd du côté du bras le plus long; dans ces conditions, l'équilibre sera impossible, et la balance s'inclinera du côté du bras le plus long. Dans ce cas, on ne peut pas remédier matériellement au vice de construction de la balance; mais nous verrons tout à l'heure cependant que, par un procédé particulier d'opération, on peut arriver à peser juste avec une balance fausse.

Balance de précision. — La balance ordinaire est un instrument trop connu pour que j'en donne la description. Je me bornerai à décrire une balance de précision en indiquant les diverses dispositions adoptées pour donner toute certitude aux pesées.

Le fléau présente la forme d'un losange allongé, ce qui lui donne dans le sens de sa tranche une très-grande rigidité; en même temps, pour diminuer son poids et ne

pas fatiguer le couteau de suspension, il est découpé et évidé, comme on le voit sur la figure 27. Nous avons déjà

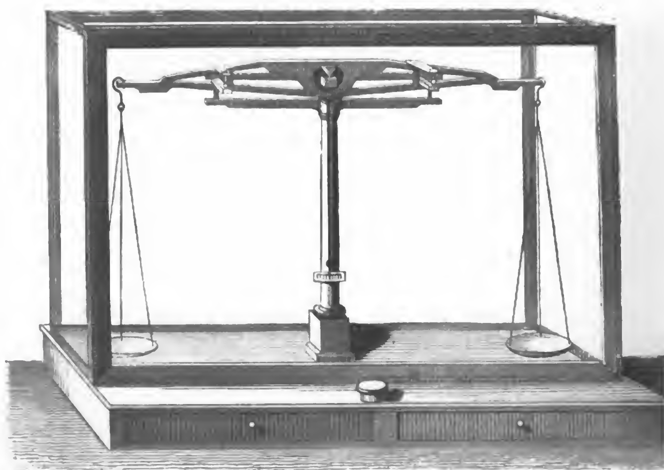


Fig. 27.

indiqué le mode de suspension, nous n'y reviendrons pas. Les extrémités des bras se terminent par une espèce d'étrier formant biseau (fig. 28), et sur lequel s'accroche un S en acier dont le bord intérieur est aussi taillé en biseau, de manière que les deux pièces ne se touchent que par un point. On obtient ainsi la plus grande mobilité possible. C'est à cet S que sont fixés les fils métalliques qui portent les plateaux. Ces plateaux sont en argent, en platine, ou tout au moins en cuivre argenté ou doré, pour qu'ils ne s'altèrent point à l'air et ne s'oxydent pas.



Fig. 28.

Le fléau repose, par son couteau, sur deux plans d'acier ou d'agate placés à la partie supérieure d'une colonne bien verticale. Au milieu du fléau est fixée une longue aiguille d'acier, qui, lorsque le fléau est horizontal, des-

cend verticalement le long de la colonne jusqu'à un arc de cercle divisé établi au pied de cette colonne. Lorsque le fléau oscille, l'aiguille fait les mêmes oscillations à angle droit sur son cercle divisé. L'aiguille, quand elle est verticale, touche le zéro de la division. A droite et à gauche sont des divisions égales. On peut admettre que lorsque dans son mouvement d'oscillation l'aiguille arrive de part et d'autre au même trait de division, elle s'arrêtera au point O, et que si elle va d'un côté au trait 8 et de l'autre au trait 4, elle s'arrêtera au trait 2 du premier côté, à égale distance des deux points d'écart. Cela dispense d'attendre le moment où le fléau serait tout à fait immobile, et permet d'opérer plus rapidement.

Lorsque la balance ne fonctionne pas, on décroche les deux plateaux, pour ne pas fatiguer inutilement leurs biseaux et ceux des extrémités. Puis, au moyen d'une double fourchette que l'on fait à volonté monter et descendre par le jeu d'un petit mécanisme très-simple caché dans la colonne, on soulève le fléau et l'on empêche ainsi le couteau de peser sur son plan d'appui, ce qui pourrait émousser sa tranche.

La colonne qui porte le fléau est fixée sur une table bien horizontale établie à demeure. Elle est, en outre, recouverte d'une cage en verre qui empêche, pendant les pesées, les agitations de l'air extérieur de se communiquer à la balance, et préserve en outre toutes les parties métalliques de l'oxydation, pourvu qu'on ait soin de maintenir l'air de la cage parfaitement sec. Il suffit pour cela de mettre sous la cage une assiette avec de la chaux vive.

On fait assez fréquemment usage, depuis quelques années, de balances qui portent leurs plateaux au-dessus du fléau. Le fléau est caché dans une boîte; les plateaux seuls sont libres au dehors (fig. 29).

Pour maintenir le parallélisme exact des tiges qui portent les plateaux et les forcer à rester toujours verticales, on les rattache l'une à l'autre par une traverse parallèle au fléau et de même longueur. Ces tiges sont supportées par les extrémités du fléau à l'aide d'un système de couteaux dont on devine facilement l'agencement. Cette dis-

position permet d'établir facilement sur les plateaux des corps volumineux, ce que l'on ne ferait pas aussi bien si

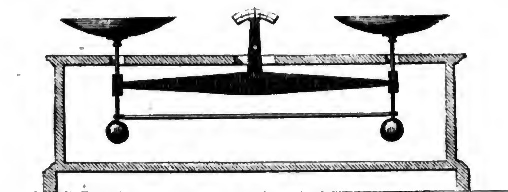


Fig. 29.

ces plateaux étaient, comme dans les balances ordinaires, supportés par des fils qui gênent toujours dans les opérations de la pesée.

Méthodes de pesée. — Voici maintenant comment on procède pour peser un corps.

On place ce corps dans l'un des plateaux, puis dans l'autre plateau des poids gradués en quantité telle que le fléau devienne horizontal. Si le corps paraît avoir un poids un peu fort, on mettra, je suppose, un poids de 200 grammes ; si ce poids de 200 grammes est trop fort, on l'enlève et on le remplace par un de 100 grammes. Supposons ce dernier poids trop faible, on y ajoute 5 décagrammes; puis si la somme est trop faible, on ajoute encore 2 décagrammes. Mettons que le poids soit trop fort, on retire les 2 décagrammes et on met à la place 1 décagramme. En procédant ainsi méthodiquement et par addition de poids de plus en plus faibles, décagrammes, grammes, décigrammes, centigrammes, etc., on arrive à donner au fléau la position d'équilibre horizontale ; ce que l'on reconnaît, comme nous l'avons dit, quand l'aiguille parcourt le même nombre de divisions à droite et à gauche du zéro. On fait alors la somme des poids gradués. Soit, par exemple :

2 hectogrammes,
6 décagrammes,
4 grammes,
3 décigrammes,
7 centigrammes.

Si 7 centigrammes sont un peu trop faibles et 8 un peu trop forts, nous ajouterons, sans pousser plus loin la pesée, 5 milligrammes, et nous aurons pour le poids du corps :

$$264^{gr},375.$$

Et l'erreur commise sur la pesée sera moindre que $\frac{1}{2}$ centigramme, car le nombre exact de milligrammes est compris entre 70 et 75 ; ou entre 80 et 75 ; l'erreur est donc moindre que 5 milligrammes ou $\frac{1}{2}$ centigramme.

Double pesée de Borda. — Cette méthode n'est applicable qu'autant qu'on est parfaitement sûr de la justesse de la balance. Voici maintenant une autre méthode de pesée qui permet de peser exactement avec une balance fausse pourvu qu'elle soit sensible. Elle est connue sous le nom de *méthode de la double pesée de Borda*, du nom du physicien qui l'a le premier employée.

Supposons qu'on ait à peser un corps solide. On le place dans le plateau A ; puis dans le plateau B on met de la grenaille de plomb, de la *cendrée*, jusqu'à ce que le fléau soit horizontal. C'est ce que l'on appelle faire la *tare* du corps. On enlève alors le corps en laissant la grenaille, et l'on met des poids à la place jusqu'à ce que l'on obtienne encore l'équilibre horizontal. Il est clair qu'alors la somme des poids gradués et le poids du corps, faisant, dans les mêmes conditions, équilibre à la même charge de grenaille, représentent des forces égales. Donc cette somme de poids gradués mesure le poids du corps.

Soit, comme second exemple, à peser un liquide contenu dans un vase. On place le vase avec son liquide dans le plateau A ; puis on met dans le plateau B de la grenaille jusqu'à ce que l'on obtienne l'équilibre. On verse le liquide hors du vase, que l'on essuie et que l'on remet ensuite sur le plateau A. Il est évident que l'équilibre est rompu puisque le liquide est de moins dans le plateau A. Mettons alors dans ce plateau des poids gradués de manière à rétablir l'équilibre : ces poids seront

l'équivalent du poids du liquide. Si l'on avait, au contraire, à introduire dans un vase un poids donné d'un corps liquide, soient 200 grammes, on mettrait le vase avec les 200 grammes dans le plateau A; puis, dans le plateau B, la quantité de grenaille nécessaire pour établir l'équilibre horizontal. On ôterait alors les 200 grammes, et on verserait lentement et avec précaution le liquide dans le vase jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. On voit que ces opérations sont aussi simples que rapides.

Romaine. — On emploie quelquefois d'autres systèmes

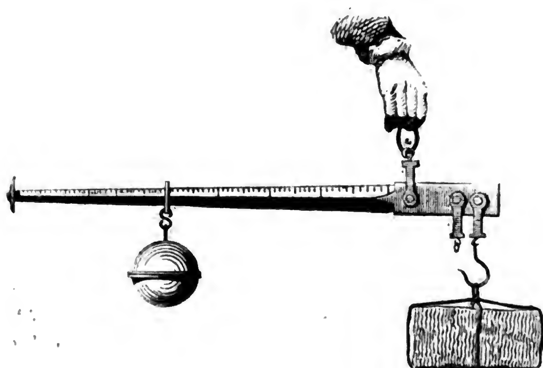


Fig. 30.

de pesage. Ainsi, on rencontre encore assez souvent un petit instrument appelé *romaine*, qui diffère de la balance en ce que l'un des bras du fléau est notablement plus long que l'autre, et porte, au lieu d'un plateau, un poids toujours le même, mais que l'on éloigne plus ou moins du point d'appui, suivant que le corps à peser est plus ou moins lourd (fig. 30). Pour graduer la romaine on procède de la manière suivante : on suspend au crochet A 1 kilogramme; puis on fait glisser le poids mobile jusqu'à ce que le fléau soit horizontal. On trace alors un petit trait au point où ce poids se trouve placé, et on inscrit sur la tige 1^k;

puis on suspend 2 kilogrammes, on éloigne le poids mobile jusqu'à ce que l'on obtienne de nouveau l'équilibre horizontal, et l'on marque 2^k, et ainsi de suite. On voit que l'on procède encore là par double pesée. Mais il ne faut pas trop se fier à ces instruments construits grossièrement, dont la graduation est souvent faite très à la légère, et qui ne sont pas soumis à une inspection aussi sévère que les balances. D'ailleurs le mode imparfait de suspension ne permet pas de constater très-exactement l'horizontalité.

Balance de Quintenz. — Les balances à peser les ballots de messageries sont des balances à bras inégaux,

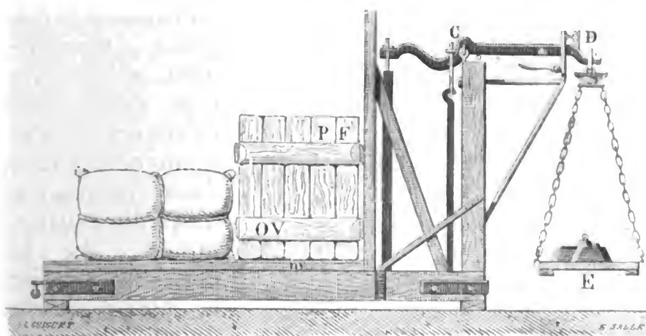


Fig. 31.

mais de longueur invariable (fig. 31). La charge est placée sur un plateau M qui pose sur deux points d'appui appartenant eux-mêmes à des pièces mobiles qui transportent l'effort de la charge tout entière au point C du fléau. Les poids gradués sont mis dans le plateau E. Les longueurs CO et OD sont telles qu'un poids de 10 kilogrammes, mis dans le plateau E, fait équilibre à un poids de 100 kilogrammes posé sur le plateau M. On ne met guère dans le plateau E de poids inférieurs au kilogramme. On peut ainsi avoir l'estimation de la charge à moins de 10 kilogrammes. Pour approcher davantage du poids exact on fait glisser un petit poids mobile sur le bras OD, qui fait

alors l'office d'une romaine. Cet appareil est connu sous le nom de *balance de Quintenz.*

Pèse-lettres. — Les petites balances avec lesquelles on pèse les lettres dans les bureaux de poste offrent encore une disposition différente. Un plateau reçoit les lettres (fig. 32). Ce plateau s'attache à une tige recourbée, mobile autour du point O, et portant de l'autre côté du point d'appui un contre-poids tel que, quand le plateau n'est pas chargé, l'aiguille qui porte ce contre-poids ait une certaine position déterminée sur un arc gradué. Lorsque la lettre est mise dans le plateau, ce plateau s'abaisse et l'aiguille, en tournant, s'élève sur l'arc gradué. On ne cherche pas ici à amener le fléau dans une position d'équilibre déterminée ; on se borne à apprécier le poids par la quantité dont l'aiguille a avancé sur le cadran. Pour connaître le poids on a placé successivement sur le plateau 1 gramme, 2 grammes, 3 grammes, et ainsi de suite, en marquant à chaque fois sur le point du cadran que touche l'aiguille le nombre de grammes. On procède donc encore ici par double pesée, puisque le corps à peser et les poids sont censés être mis successivement dans le même plateau et produire la même déviation de l'aiguille.



Fig. 32.

Peson. — Enfin on emploie aussi quelquefois un petit appareil appelé *peson à ressort* ou *dynamomètre.* Il se compose d'un ressort à boudin ou d'un ressort en forme

d'angle (fig. 33 et 34). Le corps à peser est suspendu au crochet A; pendant que l'on tient à la main l'anneau fixé à la partie supérieure du peson; il en résulte un aplatissement du ressort qui fait sortir la tige hors du cylindre ou de l'angle. On a, à l'avance, marqué sur cette tige le point d'affleurement pour des poids de 1 gramme, 2 grammes, 3 grammes; ou 1 kilogramme, 2 kilogrammes, 3 kilogrammes, etc., suivant la force du ressort; on n'a donc pour connaître le poids du corps qu'à lire sur la tige le trait de division qui est à l'affleurement de l'ouverture du cylindre, ou du côté de l'angle.

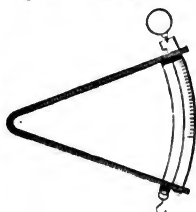

Fig. 34.


Fig. 33.

Tous ces instruments n'ont que le mérite de donner très-rapidement l'indication du poids; mais ce n'est jamais qu'avec une approximation très-grossière. Le seul instrument sur les données duquel on puisse compter est la balance.

CHAPITRE IV.

ÉQUILIBRE DES LIQUIDES. — PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

La mobilité extrême des particules des corps liquides, leur défaut de cohésion, rendent inapplicables à ces corps les conditions que nous avons données pour l'équilibre des solides pesants. Il est évident qu'il ne suffit pas de fixer un point de la masse pour l'empêcher de tomber. Il nous faut donc examiner de plus près les propriétés particulières dont jouissent les liquides, afin de pouvoir formuler nettement les conditions de leur équilibre.

Principe de l'égalité de pression. — Les liquides, sont excessivement peu compressibles, mais ils sont éminemment élastiques, c'est-à-dire que lorsqu'une force les a modifiés dans leur volume, si cette force cesse d'agir, ils reviennent exactement à leur volume primitif. Cette parfaite élasticité, jointe à la mobilité de leurs molécules, fait que lorsqu'ils reçoivent en un point de leur surface une certaine pression, ils la transmettent *dans tous les sens*, *et avec la même intensité.*

Pour bien faire comprendre notre pensée, supposons un vase de forme polyédrique rempli complétement de liquide et fermé de toutes parts. Admettons que le liquide soit soustrait à l'action de la pesanteur, afin de n'avoir à considérer que la pression artificielle appliquée en un point de la surface. Découpons maintenant sur l'une des faces une petite portion de paroi, d'une étendue de 1 décimètre carré. Comme nous avons supposé que le liquide n'était pas pesant, ce liquide restera contenu dans le vase, puisque aucune force ne le sollicite à sortir. Laissons en place la portion de paroi découpée, et appliquons sur sa surface une pression équivalente à un poids de 1 kilo-

gramme. Alors chaque décimètre carré, pris sur une paroi quelconque, en bas, en haut, sur les côtés, supportera une pression de dedans en dehors, équivalente aussi à un poids de 1 kilogramme. Et si l'on découpe sur une seconde face une portion de paroi de 1 décimètre carré, il faudra, pour l'empêcher d'être repoussée par le liquide, lui appliquer une pression extérieure de 1 kilogramme. Si cette seconde surface découpée avait 3 décimètres carrés, il faudrait, à chacun des décimètres carrés qui la composent, appliquer une pression extérieure de 1 kilogramme, ce qui ferait pour la surface entière une pression de 3 kilogrammes.

Ce principe important, qui est connu en mécanique sous le nom de principe de l'*égalité de pression*, n'est pas susceptible d'une démonstration expérimentale directe; car l'hypothèse qui veut que les molécules du liquide soient soustraites à l'action de la pesanteur n'est pas réalisable. Mais dès que l'on connaîtra la loi qui régit les pressions que les liquides produisent par leur poids sur les différents points des parois, on pourra apprécier, dans le cas où une pression étrangère s'exerce à la surface du liquide, quelle doit être la pression totale produite sur une portion déterminée de paroi. Elle se compose de la pression étrangère transmise intégralement par le liquide, et de la pression due au poids des particules de ce liquide. Rien n'empêchera plus alors de mesurer la pression effective et de la comparer à la pression calculée. Comme on les trouve parfaitement d'accord, on en conclut la réalité du principe.

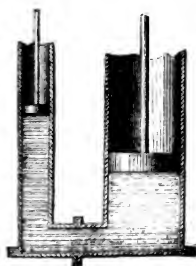


Fig. 35.

Cette loi de la transmission des pressions, si remarquable par sa simplicité, a reçu une application des plus précieuses à l'industrie. Supposons deux cylindres de diamètres très-différents (fig. 35); dans chacun de ces cylindres est un piston mobile, et toute la portion comprise au-dessous des pistons est remplie d'eau, ainsi que

le tube horizontal qui les unit. Admettons que la surface de la base du grand piston soit cinquante fois la surface de la base du petit ; ainsi le grand aura 50 centimètres carrés et le petit 1 centimètre carré. Si on applique sur ce dernier piston une pression de 1 kilogramme, elle se transmet intégralement et de bas en haut sur chaque centimètre carré du grand piston. Donc la surface totale du grand piston éprouve en somme une pression de 50 kilogrammes. En diminuant cette force, qui tend à faire monter le piston, du poids de ce piston et de l'effort nécessaire pour vaincre le frottement, il restera encore un excédant de force ascensionnelle que l'on pourra utiliser. C'est là le principe de la presse hydraulique.

Presse hydraulique. — La presse hydraulique, dont nous donnons ici la figure (fig. 36 et 37), nous présente

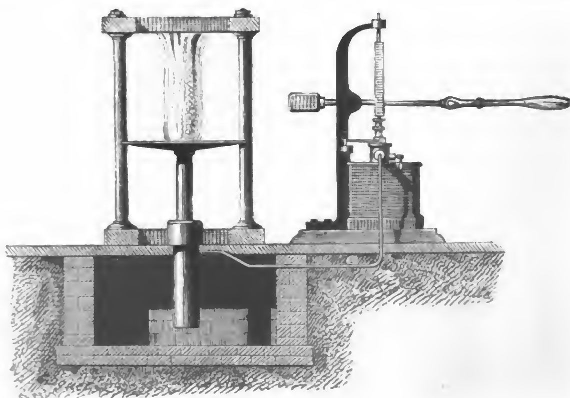


Fig. 36.

les deux cylindres dont l'un, le plus petit, est en même temps appelé à fonctionner comme pompe pour amener l'eau d'un réservoir inférieur dans la presse. En conséquence, au corps de ce cylindre fait suite un tube plus étroit qui plonge dans l'eau de ce réservoir ; une sou-

pape *p* ouvrant de bas en haut est adaptée à leur orifice de jonction, de manière à empêcher l'eau de redescendre au réservoir quand le piston s'abaisse. Ce piston *a* est un cylindre plein, en contact à sa partie supérieure avec les parois du corps de pompe, mais libre à sa partie inférieure pour diminuer l'étendue de la surface frottante. La tige de ce piston est mise en mouvement par un levier auquel on applique la force de l'homme; ou un moteur mécanique. A la partie latérale de ce corps de pompe se trouve le tube qui fait communiquer le premier cylindre avec le second. Ce tube présente d'abord en *r* une soupape ouvrant encore de bas en haut et destinée à empêcher l'eau, repoussée par le petit piston dans sa marche descendante, de retourner en arrière quand ce piston remonte. Au-dessus de cette soupape est une ouverture *r'* qui permet de la visiter et de remédier aux dérangements

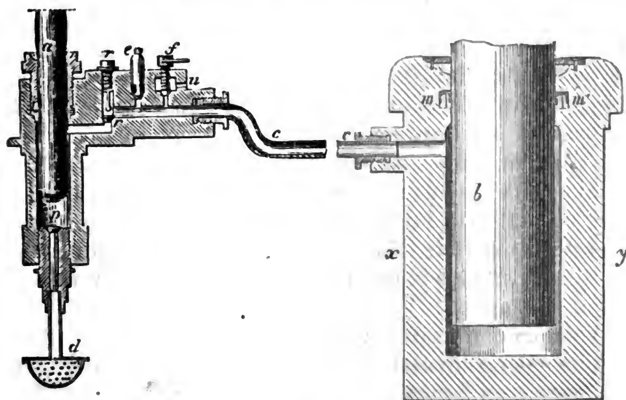


Fig. 37.

que cette soupape pourrait éprouver. En *e* est une soupape de sûreté. C'est une petite ouverture fermée par un bouchon métallique chargé d'un poids que l'on règle suivant la pression que l'on veut donner comme limite à l'action de la presse. Si l'on veut, par exemple, que

chaque centimètre carré de la surface du grand piston supporte une pression de 10 kilogrammes, et si la largeur de la soupape est de 50 millimètres carrés, on la chargera d'un poids un peu supérieur à 5 kilogrammes; lorsque la pression surpassera la limite imposée, la soupape *e* se soulèvera et laissera passage à l'eau. Il existe une dernière ouverture représentée sur la figure en *f* et qui sert à laisser échapper l'eau de l'appareil quand elle a produit son effet. Cette ouverture reste fermée par un bouchon à vis. L'eau sort par le petit conduit latéral que l'on voit en *u*.

Il nous reste actuellement à parler du grand cylindre. Son piston présente une étendue de base cent cinquante ou deux cents fois plus grande que celle du petit piston. Il serait à peu près impossible, avec un piston aussi large, d'obtenir une jonction parfaite avec les parois du cylindre; et d'ailleurs il faut conserver au piston la faculté de monter et de descendre sans de trop grands frottements. Cela crée tout de suite une difficulté, celle d'empêcher l'eau de se perdre entre le piston et les parois; et si l'eau s'échappe, le piston ne montera pas. Une addition ingénieuse faite à l'appareil, par le mécanicien anglais Bramah, a fait disparaître cette cause de déperdition et a permis alors d'appliquer aux besoins de l'industrie une machine qui était restée longtemps dans les cabinets de physique comme un simple appareil de démonstration et qui est maintenant un des agents les plus puissants et le plus universellement employés.

Voici en quoi consiste ce perfectionnement.

Une galerie circulaire *mm'* est creusée dans l'épaisseur des parois en fonte du cylindre, épaisseur qui est considérable. Dans cette galerie est disposé un anneau creux en cuir coupé par le milieu. Pour se figurer sa forme, on n'a qu'à se représenter une gouttière demi-cylindrique et repliée de manière que les deux extrémités se rejoignent. Cet anneau, appelé *anneau de Bramah*, est logé dans la galerie, sa concavité tournée vers le bas, touchant par son bord intérieur au piston, et par son bord extérieur à la

paroi de la galerie. Grâce à cette disposition, l'eau qui pénètre dans la galerie fait appuyer le cuir de la soupape à la fois sur le piston et sur la paroi, et se ferme d'autant mieux le passage qu'elle presse plus fortement.

Au-dessus du piston et lié à sa masse, est établi un plancher mobile qui peut s'élever entre deux montants verticaux solidement établis et surmontés d'un plafond en fonte. C'est entre ce plafond fixe et le plancher mobile que l'on dispose les corps destinés à être écrasés par la presse, comme les olives, les noix, les betteraves, etc.

Lorsqu'on a produit avec la presse une certaine pression, si l'on veut avoir une pression plus forte encore, on peut, au petit piston, substituer un piston de diamètre plus petit. Pour cela, ce piston est formé de deux cylindres concentriques, le plus petit pouvant glisser à frottement dans le plus grand (fig. 38). Pendant la première période de l'opération, une petite clavette *m* traverse le cylindre enveloppant et pénètre d'une petite quantité dans la tige intérieure de manière à fixer les deux pièces ensemble; le piston fonctionne alors avec la base *ab* tout entière.

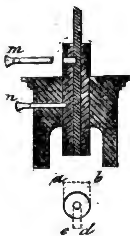


Fig. 38.

Dans la seconde période, on enlève cette clavette et on la remplace par une autre *n* qui fixe alors le cylindre enveloppant aux parois du corps de pompe; alors le piston ne fonctionne plus qu'avec la base *cd*. On voit l'avantage qui résulte de cette disposition. Si le piston supporte une charge de 50 kilogrammes, et si la surface *ab* est de 10 centimètres carrés, cela donne pour chaque centimètre carré une pression de 5 kilogrammes; si la surface *cd* n'est plus que d'un demi-centimètre carré, cela donne alors 100 kilogrammes par centimètre carré, et la pression totale qu'exerce le grand piston se trouve être 20 fois plus grande, par cela seul que la surface du petit piston est 20 fois plus petite.

Cette machine est employée, comme nous l'avons déjà

dit, pour extraire l'huile des graines oléagineuses, pour retirer le jus sucré des betteraves, des cannes à sucre; elle sert encore à essayer la résistance des câbles à la traction. On peut aussi la faire servir à soulever des masses d'un grand poids, comme des locomotives, par exemple. C'est avec une presse hydraulique que l'on a élevé sur leurs piles les cylindres en fonte du pont tubulaire qui unit l'île d'Anglesey aux côtes d'Angleterre.

L'importance de la presse hydraulique dans l'industrie justifie suffisamment les détails que nous avons donnés sur sa construction et ses usages; revenons maintenant aux conditions d'équilibre des liquides.

Équilibre des liquides. — Nous aurons d'abord à établir les conditions d'équilibre de la surface libre du liquide, puis celle de la masse intérieure.

La condition nécessaire pour l'équilibre de la surface libre est que cette surface soit horizontale. Il y aurait en effet absurdité à supposer que l'équilibre pût exister, cette condition n'étant pas remplie. Admettons pour un moment l'équilibre, et représentons-nous les molécules de la masse située au-dessous de la couche superficielle, liées entre elles par la cohésion (fig. 39), Si l'équilibre existait avant, à bien plus forte raison devrait-il exister maintenant. Or, chaque molécule de la couche superficielle serait alors comme une bille posée sur un plan incliné, et qui, attirée par la pesanteur, et par cela même tendant à descendre le plus bas possible, roule vers les parties déclives de ce plan. Il y aurait mouvement des particules liquides de *a* vers *b*, c'est-à-dire qu'il n'y aurait pas équilibre. On voit donc qu'il faut nécessairement que la surface libre soit horizontale, c'est-à-dire perpendiculaire à la direction de la pesanteur.

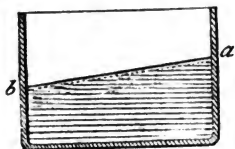


Fig. 39.

Quant à la masse intérieure, elle doit satisfaire à cette condition que deux petites surfaces de même étendue prises dans l'épaisseur d'une couche horizontale quel-

conque, aussi mince qu'on peut la concevoir, supportent la même pression. La démonstration de ce principe suppose des notions de mécanique qui ne peuvent entrer dans un cours aussi élémentaire; nous l'admettons comme démontré, nous réservant d'en tirer des conséquences que l'expérience vérifie complétement. Nous pourrons regarder alors cette vérification des corollaires du théorème comme une démonstration suffisante du théorème lui-même.

Puisque les liquides sont pesants, il est évident que si l'on considère une couche horizontale ou une portion de couche à une certaine profondeur au-dessous de la surface libre, elle a à supporter une pression due au poids des couches liquides situées au-dessus. Conséquemment la pression supportée sera d'autant plus grande que la couche que l'on considérera sera prise à une profondeur plus considérable. En même temps, par le fait de l'élasticité, chaque couche pressée réagit sur la couche immédiatement au-dessus qui la presse, et aussi sur l'anneau de paroi solide qui l'enveloppe. Ainsi les parois du vase sont pressées par le liquide, et tous les points pris à la même profondeur verticale au-dessous du niveau du liquide doivent supporter la même pression, puisque tous ces points appartiennent à une couche horizontale pour laquelle la pression est la même partout.

Exposons succinctement les principes relatifs à l'énergie de ces pressions.

Pression sur le fond. — La pression sur le fond d'un vase ne dépend absolument que des dimensions du fond, de la hauteur du liquide et de sa densité. Elle est indépendante de la forme du vase.

Pour le démontrer, prenons un tube cylindrique en verre (fig. 40), muni à sa partie inférieure d'une garniture en cuivre qui permet de le visser sur un support à trois pieds. Le tube se ferme à sa partie inférieure par un disque de verre dépoli, usé sur les bords mêmes du tube, de manière à pouvoir s'y appliquer exactement et former le fond. Un fil est attaché par un petit crochet au centre

du disque, monte dans l'intérieur du tube et vient s'attacher à l'une des extrémités du fléau d'une balance. Dans le plateau suspendu à l'autre extrémité, on met de la tare pour équilibrer le poids du disque, puis, l'équilibre établi, on soulève l'axe de la balance à l'aide d'une crémaillère et l'on amène le disque en contact avec les bords du cylindre. Cela fait, on ajoute une surcharge de 100 grammes dans le plateau de la tare, de manière à faire appuyer le disque obturateur de bas en haut sur les

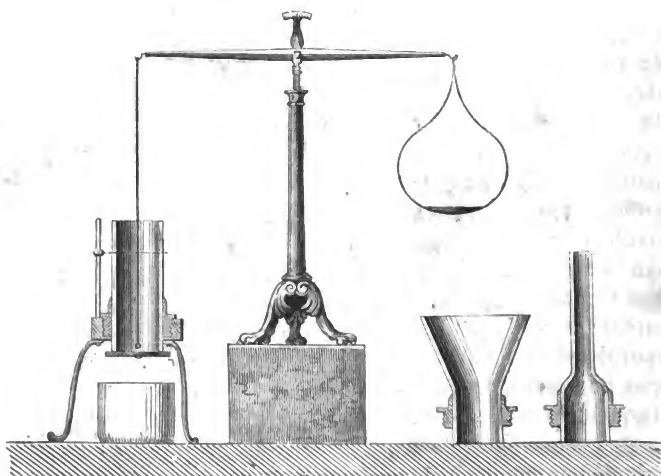


Fig. 40.

bords du tube. On versera alors de l'eau avec précaution dans le tube jusqu'à ce que, le niveau s'étant élevé à une certaine hauteur, tout ce que l'on versera en excès fasse détacher le disque des bords et s'échappe. En ce moment on peut considérer la pression du liquide sur le fond du vase comme équilibrée par le poids de 100 grammes. Un petit index latéral est amené à la hauteur du liquide, puis on détache le disque ; on fait écouler l'eau complétement, et l'on remplace le tube cylindrique par un tube évasé ou

rétréci, mais présentant cependant, à sa partie inférieure, le même diamètre que le tube cylindrique. Le plateau de la tare conservant sa charge, on trouve qu'il faut ramener l'eau au niveau de l'index resté en place, pour faire équilibre à la même pression de 100 grammes. Ceci démontre bien que la pression exercée par le liquide est indépendante de la forme du vase, et qu'elle ne dépend, quand on se sert du même liquide et que le fond reste le même, que de la hauteur de ce liquide. De plus, si on prend les dimensions de la base du cylindre et la hauteur de l'eau, de manière à pouvoir calculer le volume de cette masse d'eau en centimètres cubes, par suite son poids en grammes, ou mieux encore, si l'on pèse le liquide sorti du vase cylindrique, on trouvera que le poids de cette masse d'eau est précisément de 100 grammes.

Donc la pression que le liquide exerce sur le fond du vase est égale au poids du liquide contenu dans le cylindre vertical qui aurait pour base le fond, et pour hauteur la hauteur verticale du liquide. Il s'ensuit que si on dresse un tonneau exactement plein d'eau, sur son fond, puis qu'on adapte, à un trou percé à son fond supérieur, un bouchon traversé par un tube de très-petit diamètre, l'eau déplacée par le bouchon montera dans le tube à une certaine hauteur, d'autant plus grande que le tube sera de plus petit diamètre, et elle pourra très-bien faire crever le tonneau, car si elle s'élève dans le tube à une hauteur de 1 mètre, elle produira un excès de pression égal au poids d'une colonne ayant 1 mètre de hauteur et le fond du tonneau pour base.

Pression sur les parois latérales. — Si nous concevons maintenant sur une paroi latérale une très-petite portion de surface, nous pouvons admettre, sans erreur sensible, qu'elle supporte en tous ses points la même pression, et que cette pression est la même que si la petite surface en question était horizontale. Cette pression sera donc le poids du filet liquide vertical qui s'appuie sur cette petite portion de surface et s'élève jusqu'à la surface libre du liquide. Il suit de là que si on prend maintenant

une portion de surface d'une largeur appréciable, on pourra la décomposer en une multitude de petites portions de surface du genre de celle que nous considérions tout à l'heure; et si l'on prend pour chacune d'elles la mesure que nous venons de donner de la pression, on voit que la pression verticale totale sera représentée en intensité par le poids du volume liquide qui, s'appuyant sur cette surface, s'élèverait verticalement jusqu'à la surface libre. Ainsi en *ab* (fig. 41), la pression qui s'exerce de haut en bas verticalement aurait pour intensité le poids du filet *abcd;* et en *mn*, la pression qui s'exerce verticalement de bas en haut a pour mesure le poids du liquide qui remplirait l'espace *mnop*.

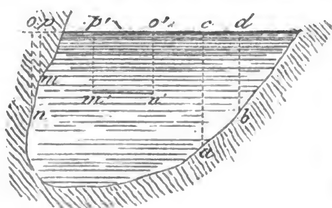


Fig. 41.

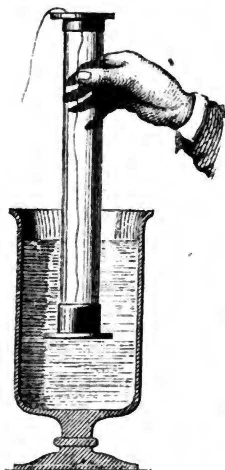
Quant à la pression perpendiculaire à la surface, elle a pour mesure le poids du cylindre liquide qui aurait pour base cette surface, et pour hauteur la distance de son centre de gravité au niveau du liquide.

Tout ce que nous venons de dire des pressions exercées sur une portion de paroi, s'applique évidemment aux pressions produites sur une portion de couche horizontable ou oblique prise dans le liquide.

Remarquons maintenant que, quoique la couche *m'n'* supporte de haut en bas une pression égale au poids de la colonne liquide verticale qui aurait *m'n'* pour base et s'élèverait jusqu'à la surface libre, cependant cette couche reste en équilibre avec le liquide tout entier. Il faut donc que cette pression soit équilibrée par une force égale et de sens contraire. Cette pression doit exister en effet, car si on supposait solidifiée toute la partie liquide *m'n'o'p'*, l'équilibre n'en serait pas troublé. Or, *m'n'* deviendrait alors une portion de paroi sur laquelle s'exercerait de bas en haut une pression verticale égale au poids du liquide qui aurait *m'n'* pour base et *m'p'* pour hauteur. C'est donc

bien la pression nécessaire pour équilibrer celle du liquide qui existe réellement au-dessus. Si cet espace *m'n'o'p'* venait à être vidé de liquide de manière qu'il n'y eût plus de pression de haut en bas, l'équilibre serait troublé, et *m'n'* serait sollicité à monter.

Pour bien constater l'existence de cette pression, prenons, comme dans l'expérience citée plus haut, un tube de verre muni d'un obturateur soutenu avec un fil, et enfonçons-le ainsi dans l'eau (fig. 42). A peine le tube sera-t-il entré dans le liquide, qu'il deviendra inutile de tendre le fil ; le disque sera maintenu adhérent par la pression dont nous venons de parler. Si nous versons de l'eau dans le tube jusqu'au niveau du liquide dans le vase, alors la pression sera équilibrée et le disque tombera.


Fig. 42.

Paradoxe hydrostatique. — De ce que la pression sur le fond d'un vase est indépendante de la forme de ce vase, il n'en résulte pas que, celui-ci étant placé plein d'eau sur le plateau d'une balance, la somme de poids qu'il faudra mettre dans l'autre plateau pour établir l'équilibre doive être égale à celle qui mesurerait cette pression. Ces poids ont pour but en réalité d'empêcher le vase de tomber, et la force qui le fait tomber c'est le poids entier du vase et du liquide qu'il contient. Il n'y a là qu'une ressemblance apparente avec l'expérience de la page 60. Dans l'appareil (fig. 40), les parois latérales sont soutenues et il n'y a que le fond qui soit mobile.

Équilibre des liquides superposés. — Nous n'avons jusqu'à présent parlé que du cas où le vase ne renfermait qu'un seul et même liquide : si l'on introduit des liquides

de densités différentes qui ne puissent ni se mêler ni réagir chimiquement l'un sur l'autre, comme du mercure, de l'eau, de l'huile, on voit ces liquides se disposer dans l'ordre suivant : le plus dense, le mercure, en-dessous, l'eau par-dessus, et le plus léger, l'huile, à sa partie supérieure; et de plus, les surfaces des trois liquides sont horizontales. Pour s'expliquer cette disposition, on n'a qu'à supposer solidifiés les deux liquides inférieurs, et l'on sait que j'entends par là qu'on établit entre les molécules de ces liquides les liaisons de cohésion qui existent entre les points d'un corps solide. Si l'équilibre existait auparavant, *a fortiori* existera-t-il maintenant. Le liquide intermédiaire devient alors tout simplement le fond du vase sur lequel repose le liquide supérieur, et la surface de celui-ci doit être horizontale, puisque nous sommes ainsi ramenés au cas d'un seul liquide. Si maintenant nous nous représentons une couche horizontale menée au-dessous de la surface de séparation de l'huile et de l'eau (fig. 43), il faut que tous les points de cette couche supportent la même pression. Ainsi, si en deux points différents de cette couche nous prenons une petite surface de 1 centimètre carré, il faut que le poids du cylindre vertical qui aura pour base ce centimètre carré soit le même en ces deux points. Or, cette condition ne serait pas remplie si la surface de séparation *cd* était oblique comme nous l'avons figurée ; car les deux liquides inégalement denses, l'eau et l'huile, y étant répartis en quantités différentes, les poids ne sauraient être égaux. Donc la surface *cd* doit être horizontale, et le même raisonnement s'appliquera à l'autre surface de séparation. On voit ainsi se vérifier dans une de ses conséquences le principe de l'égalité de la pression sur tous les points d'une même couche horizontale.

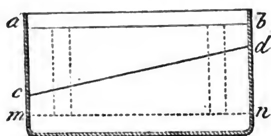


Fig. 43.

Vases communiquants. —Voici maintenant une autre vérification également intéressante de ce même principe.

Soient deux vases, de diamètre et de forme quelconques, réunis à leur partie inférieure par un tube de communication (fig. 44). Si l'on verse dans l'un d'eux un liquide, on le voit se répandre dans les deux vases et les deux niveaux libres se fixent dans un même plan horizontal. Or, c'est bien là la disposition qu'exige le principe en question. En effet, si nous menons la couche horizontale *mn*, elle doit supporter en tous ses points la même pression, c'est-à-dire qu'un centimètre carré pris sur cette couche dans l'un ou dans l'autre vase doit avoir à supporter le poids d'un même cylindre vertical; cela exige donc que la surface libre ait, dans les deux vases, la même hauteur au-dessus du plan horizontal *mn*.

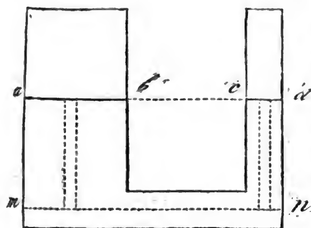


Fig. 44.

Si dans un système de vases communiquants pleins d'eau jusqu'au niveau *abcd* (fig. 45), on vient à remplacer l'eau comprise entre *ab* et *ef* par un liquide trois fois moins dense que l'eau, pour que chaque centimètre carré pris sur la surface plane *ef* supporte la même pression qu'auparavant, il faudra que le nouveau cylindre liquide qui a le centimètre carré pour base ait une hauteur triple de la hauteur précédente, triple par conséquent de la hauteur *gc*. Ainsi, pour que l'équilibre puisse exister, il faut, quelle que soit la forme des vases, que les hauteurs des deux liquides, comptées à partir de leur surface horizontale de séparation *ef*, soient en raison inverse de leurs densités. Si, par exemple, dans un vase plein de mercure on

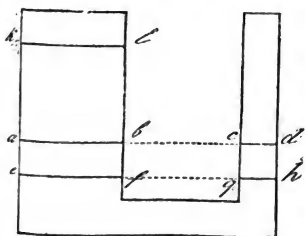


Fig. 45.

introduit un tube de verre ouvert aux deux extrémités (fig. 46), et si on vient ensuite à verser de l'eau sur le mercure autour du tube, la hauteur de l'eau *ac* sera treize fois et demie la hauteur du mercure, *ab*, le mercure étant treize fois et demie aussi dense que l'eau. C'est en effet ainsi que s'établissent les niveaux.

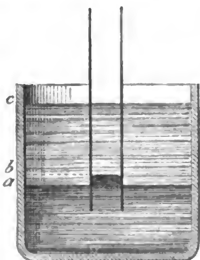


Fig. 46.

Principe d'Archimède. — Poussée. — De tout ce que nous venons de dire des pressions que les liquides exercent sur les parois horizontales ou obliques, il résulte que lorsqu'un corps est plongé dans une cuve pleine d'eau, il supporte sur tous les points de sa surface des pressions très-inégales. Les plus grandes sont celles qui s'exercent sur les parties les plus basses du corps, et celles-là agissent de bas en haut : il devra alors en résulter une force ascensionnelle tendant à amener le corps vers la surface du liquide. C'est cette force qu'on appelle la *poussée*.

Archimède a démontré qu'elle était égale aux poids du liquide que déplace le corps, et il a énoncé le principe sous cette forme bien connue : *Tout corps plongé dans un liquide perd de son poids le poids du liquide déplacé.*

Dans un liquide quelconque (fig. 47), représentons-nous une certaine portion de la masse, limitée par une surface fermée *mno* de forme arbitraire; le liquide étant en équilibre, si nous supposons tous les points de cette masse *mno* liés entre eux par la cohésion, il est évident que l'équilibre n'en sera que mieux assuré. Or, cette masse tend à tomber sous l'influence de la pesanteur agissant sur chaque molécule, par conséquent sous l'action totale du poids, et cependant elle ne tombe pas. Il

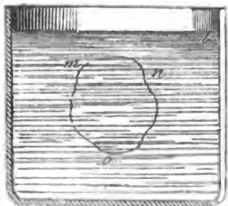


Fig. 47.

faut donc qu'il y ait une force qui la soutienne. Cette force, nous en avons fait comprendre l'existence, c'est la poussée. Ainsi, la poussée qui agit verticalement de bas en haut sur la masse *mno*, et qui résulte de toutes les pressions que le liquide environnant exerce sur la surface, est égale au poids de cette masse liquide *mno* elle-même. Or, si nous substituons au liquide *mno* un corps quelconque, les pressions exercées par le liquide environnant ne changeront pas pour cela; la poussée sera toujours la même, donc elle est égale au poids du liquide dont le corps tient la place.

Ce principe a une telle importance, il est d'une application si continuelle, que nous ne saurions en fournir trop de preuves : nous allons le démontrer par l'expérience.

Nous prendrons pour cela deux cylindres de laiton, l'un plein, l'autre creux ; le dernier pouvant être rempli

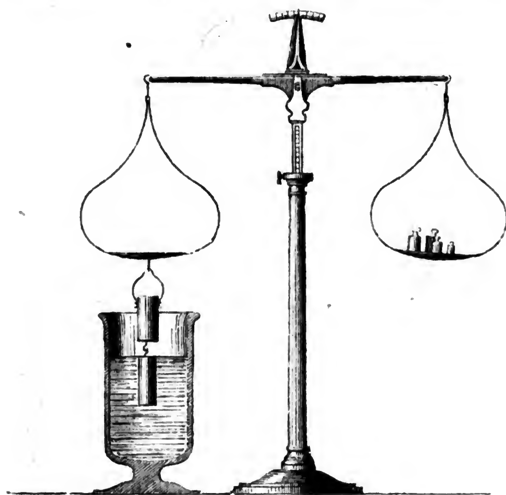


Fig. 48.

exactement par le premier, de telle sorte que sa capacité intérieure soit égale au volume extérieur du cylindre plein (fig. 48). On les suspend tous les deux, l'un au-des-

sous de l'autre, le cylindre plein sous le cylindre creux, à l'un des plateaux d'une balance. La colonne de cette balance est formée de deux pièces qui peuvent glisser l'une dans l'autre dans le sens vertical; une crémaillère analogue à celle du cric, et mue par un pignon, permet de relever à volonté la portion supérieure qui porte le fléau. On donne à cette balance le nom de *balance hydrostatique*.

Les deux cylindres étant suspendus, comme nous l'avons dit, à l'un des plateaux, on met dans l'autre plateau la quantité de grenaille ou de poids nécessaire pour établir l'équilibre horizontal. Puis on fait alors plonger le cylindre inférieur dans un vase plein d'eau placé au-dessous. Immédiatement l'équilibre est rompu, comme si l'on poussait par dessous le plateau qui porte les cylindres. Il faut avoir soin de soulever le vase plein d'eau, de manière que le cylindre massif soit complétement plongé. Pour rétablir l'équilibre, il faudra mettre dans le plateau qui paraît trop léger un excédant de poids. Or, d'après le principe d'Archimède, la perte de poids est égale au poids du liquide déplacé. Il existe un moyen très-simple de restituer cette différence : c'est de remplir d'eau le cylindre creux. Si l'on adopte ce moyen, on voit, en effet, le fléau revenir aussitôt à la position horizontale. Ici il faudra faire redescendre le vase en même temps que le plateau soulevé redescend lui-même, afin que le cylindre supérieur ne touche pas l'eau, mais que le cylindre inférieur soit toujours complétement plongé.

Pour donner une idée de l'importance pratique de ce principe, supposons qu'un corps solide pèse dans l'air 335 grammes, et que suspendu au plateau de la balance et plongé dans l'eau, il perde 15 grammes de son poids, c'est-à-dire qu'il faille, au plateau qui le porte, ajouter 15 grammes pour rétablir l'équilibre rompu par l'action de la poussée; on conclura, en appliquant le principe d'Archimède, que ce poids de 15 grammes est le poids du volume d'eau déplacé, et que puisque 1 gramme est le poids de 1 centimètre cube d'eau, le volume du corps est de 15 centimètres cubes. On voit aussi que le corps

pèse $\frac{335}{15}$ ou 22,33 fois autant que l'eau sous le même volume.

L'or est, après la platine, le plus lourd de tous les métaux. Si on allie à l'or un métal moins dense et en même temps d'un prix moins élevé, comme l'argent ou le cuivre, l'alliage aura une densité et une valeur moindres que celle de l'or. Ainsi l'or pèse 19 fois autant que l'eau sous le même volume, et l'alliage ne pèsera plus, par exemple, que 15 fois autant que l'eau. On reconnaîtra ainsi assez facilement la présence d'un métal étranger. C'est un problème pratique de ce genre qui conduisit le savant Syracusain à la découverte du principe qui nous occupe.

Équilibre des corps plongés et des corps flottants. — Comme conséquence de cette loi d'Archimède, voyons quelles conditions doit remplir un corps pour rester en équilibre au milieu d'un liquide. S'il pèse autant que ce liquide sous le même volume, ce qui arrivera, entre autres cas, s'ils ont même densité, la force qui tend à le faire tomber, son poids, sera égal à la force qui tend à le faire monter, la poussée, et alors il restera en place dans le liquide sans monter ni descendre. S'il pèse plus que le liquide sous le même volume, le poids l'emportant sur la poussée, le corps descendra au fond du vase. Enfin s'il pèse moins que le liquide sous le même volume, ce sera au contraire dans ce cas la poussée qui l'emportera sur le poids, et le corps montera. Il arrivera ainsi à toucher la surface du liquide, puis à sortir en partie; mais alors les conditions changent, car le corps a toujours le même poids, tandis que la poussée n'est plus la même, puisqu'il ne plonge plus complétement. Cette poussée est diminuée; elle peut être aussi petite qu'on veut, puisqu'on peut faire plonger le corps dans le liquide d'une quantité aussi petite que l'on voudra; il y a donc nécessairement une position du corps pour laquelle le poids du liquide déplacé par la partie plongée n'est plus que justement égal au poids total du corps. Il est clair que ce n'est qu'à cette condition qu'il y a équilibre.

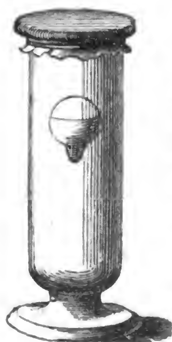
La condition d'équilibre pour un corps plongé entière-

ment, c'est que son poids soit le même que le poids d'un volume de liquide égal au sien. La condition pour un corps flottant, c'est que son poids total soit égal au poids du volume liquide déplacé par la partie plongée.

Ainsi, le liége, pesant environ quatre fois moins que l'eau sous le même volume, si vous enfoncez un bouchon de liége dans l'eau, et si vous l'abandonnez à lui-même, il remontera et viendra flotter à la surface, plongeant dans le liquide du quart de son volume.

Un vaisseau pèse en totalité autant que l'eau qu'il déplace, et dont le volume s'exprime en mètres cubes ou *tonneaux*. Ainsi, un navire de 600 tonneaux déplace 600 mètres cubes d'eau, et pèse par conséquent 600,000 kilogrammes.

Ludion. — Le principe d'Archimède va encore nous donner l'explication d'un phénomène assez singulier au premier abord, et que les bateleurs montrent quelquefois au grand étonnement du public ignorant qui les regarde. Un vase profond et plein d'eau est fermé à sa partie supérieure par une membrane ou une feuille de caoutchouc (fig. 49). Dans le liquide flotte une boule mince de verre percée d'un petit trou à sa partie inférieure, et portant une petite figure en émail. Lorsqu'on presse sur la membrane avec la paume de la main ou le doigt, la pression se transmet au liquide, qui pénètre par le trou dans la boule. Le poids de l'appareil flotteur devenant plus grand, l'équilibre est rompu et la petite figure descend. Lorsqu'on cesse de presser, l'air comprimé dans la boule en chasse le liquide qui s'y était introduit, et l'appareil devenu plus léger, remonte. Il semble ainsi obéir aux ordres du bateleur, dont la main n'exécute que des mouvements tout à fait imperceptibles à distance.


Fig. 49.

Il faut remarquer qu'il est certains corps que l'eau ne mouille pas : c'est-à-dire que lorsqu'ils sont enfoncés

dans l'eau, il n'y a pas contact entre eux et le liquide. Les deux corps sont séparés par une espèce de petite gaîne vide, ou plutôt occupée par de l'air; ce qui fait que le corps déplace un volume d'eau réellement plus grand que son propre volume. C'est ce qui explique qu'une mince aiguille d'acier, frottée avec du suif ou couverte de poussière, puisse flotter à la surface de l'eau.

En exposant le principe de l'équilibre des liquides superposés dans un même vase nous n'avons pas expliqué pourquoi le liquide le plus dense s'établit au fond; on n'aura pas de peine à comprendre que c'est là la conséquence directe du principe d'Archimède.

CHAPITRE V.

DENSITÉS DES CORPS SOLIDES ET LIQUIDES.

Densité.—Nous avons défini *densité d'un corps* le rapport qui existe entre le poids d'un certain volume de ce corps et le poids d'un égal volume d'eau. La densité d'un corps varie évidemment si des causes quelconques viennent à faire varier son volume. Entre autres causes, il faut mettre en première ligne l'action de la chaleur qui, comme nous le verrons plus tard, a pour effet de *dilater* les corps c'est-à-dire d'augmenter leur volume. Aussi, doit-on préciser l'état de chaleur des corps et de l'eau. Notre définition serait donc incomplète. Pour lui donner tout le degré de précision désirable, nous dirons que la densité d'un corps est le rapport entre le poids d'un certain volume de ce corps pris à la température de fusion de la glace, et le poids d'un même volume d'eau pris à la température de 4°, température de sa plus grande densité.

On définit quelquefois aussi la densité d'un corps le rapport du poids de ce corps à son volume, rapport qui donne évidemment le poids de l'unité de volume. Nous ferons remarquer que la différence entre ces deux définitions n'est qu'apparente. En effet le gramme étant le poids de 1 centimètre cube d'eau prise à 4°, chaque gramme du poids de l'eau représente 1 centimètre cube de son volume. Par conséquent le nombre qui donne le poids de l'eau, prise à 4°, en grammes, donne en même temps son volume en centimètres cubes. Donc, diviser le poids du corps par le poids d'un égal volume d'eau, revient à diviser le poids du corps par le volume.

La détermination des densités a une très-grande importance pratique, car la connaissance de ces nombres permet de résoudre des questions qui se présentent à

chaque instant en mécanique et dans l'industrie. Supposons qu'on ait à soulever un bloc de fonte cubique de 60 centimètres de côté, quelle force faudra-t-il déployer pour l'enlever, ou plus simplement quel est son poids? Le cube qui a 60 centimètres de côté, a en volume 60 × 60 × 60 centimètres cubes ou 216 000 centimètres cubes. Or, la densité de la fonte étant environ 7, puisque 1 centimètre cube d'eau pèse 1 gramme, 1 centimètre cube de fonte pèse 7 grammes, et le cube pèse 216 000 fois 7 grammes ou 1512 kilogrammes.

Si l'on avait besoin, au contraire, de connaître le volume d'une masse de plomb qui pèse 275 kilogrammes, nous chercherions dans les tables des densités la densité du plomb qui est 11, ce qui nous indique que 1 décimètre cube de plomb pèse 11 kilogrammes, puisque 1 décimètre cube d'eau pèse 1000 grammes ou un kilogramme.

Si nous divisons donc 275 par 11, nous saurons combien de fois le poids du plomb contient 11 kilogrammes, ce qui nous dira combien son volume renferme de décimètres cubes. Le quotient de la division est 25, donc la masse de plomb a un volume de 25 décimètres cubes.

Ainsi on connaîtra le poids d'un corps exprimé en kilogrammes, en multipliant son volume, exprimé en décimètres cubes, par sa densité;

On connaîtra le volume, en décimètres cubes, en divisant le poids, exprimé en kilogrammes, par la densité;

Et l'on connaîtra la densité en divisant le poids du corps, en kilogrammes, par son volume en décimètres cubes.

Si l'on prenait le gramme comme unité de poids, il faudrait prendre alors le centimètre cube pour unité de volume, car le gramme est le poids du centimètre cube d'eau, comme le kilogramme est le poids de 1 décimètre cube de ce même liquide.

Mesure des densités. — Corps solides. — La détermination précise d'une densité est une opération qui exige des précautions particulières d'expérience, et aussi quelques calculs pour tenir compte de l'état de la température

des corps. Mais lorsqu'on ne demande qu'une valeur approchée à moins de 1 centième, on peut négliger ces corrections et se borner à prendre le rapport entre le poids du corps à la température ordinaire, et le poids du même volume d'eau à la même température.

En parlant, dans le chapitre précédent, du principe d'Archimède, nous avons déjà fait entrevoir comment on pourrait faire servir ce principe à la détermination des densités. Donnons un exemple pour faire comprendre la méthode expérimentale à suivre.

Prenons un morceau de soufre et suspendons-le par un fil, assez fin pour que son poids soit négligeable, sous le plateau d'une balance hydrostatique. Mettons dans l'autre plateau la quantité de tare nécessaire pour faire équilibre; puis enlevons le soufre et remplaçons-le par des poids de manière à retablir l'équilibre. Ces poids, déterminés par la double pesée de Borda, représentent le poids du soufre ; soient : 7^{gr},67. Cela fait, nous enlevons les poids et nous replaçons le corps sous son plateau, en le faisant plonger dans l'eau d'un vase placé au-dessous. Puisque le corps plongé dans l'eau perd de son poids le poids du volume d'eau déplacé, la quantité de poids qu'il faut ajouter sur le plateau pour rétablir l'équilibre représente l'équivalent du poids d'eau déplacé, ou du poids d'un volume d'eau égal au volume du corps. Nous trouvons dans ce plateau 3^{gr},78. Divisant 7,67 par 3,78, nous avons la densité du soufre 2,02 ; — approximativement 2.

Aréomètre de Nicholson. — Comme une balance est un appareil d'un prix assez élevé, surtout quand on lui demande un certain degré de précision, on peut la remplacer par le petit appareil appelé balance ou aréomètre de Nicholson (fig. 50), et qui donne une approximation suffisante.

Il se compose d'un cylindre creux en laiton fermé par deux cônes. Le cône supérieur est surmonté d'une petite tige mince terminée par un plateau. Sur cette tige se trouve au milieu un petit trait ou un petit bouton appelé

trait d'affleurement. Au cône inférieur est suspendu un autre cône tournant sa base vers le haut et lesté à l'intérieur avec du plomb. Malgré ce lest, l'appareil total est plus léger qu'un volume d'eau égal au sien, et plonge dans ce liquide jusqu'à la base de son cône supérieur; le lest le maintient vertical.

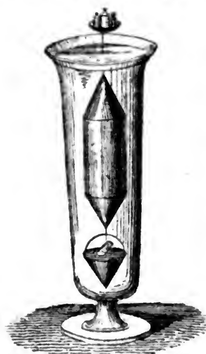


Fig. 50.

On met alors dans le plateau supérieur le morceau de soufre, et on le prend assez petit pour qu'il ne fasse pas enfoncer l'aréomètre jusqu'à son trait d'affleurement. On ajoute alors la quantité de grenaille nécessaire pour obtenir cet affleurement. On enlève ensuite le corps et on le remplace par des poids qui rétablissent l'affleurement détruit. Ces poids donnent le poids du corps, puisqu'ils produisent le même effet. On met enfin le corps sur la base du cône lesté, de manière qu'il plonge dans l'eau avec l'appareil, et on enlève des poids du plateau supérieur jusqu'à ce que l'on obtienne une dernière fois l'affleurement. Les poids qui restent alors sur le plateau complètent ce qui manque au poids du corps dans l'eau pour faire l'équivalent du poids dans l'air. Ils donnent donc le poids de l'eau déplacée. Nous avons ainsi, par de véritables doubles pesées, et le poids du corps, et le poids d'un égal volume d'eau. En divisant ces deux nombres l'un par l'autre, nous obtenons la densité.

On peut procéder encore d'une autre façon. En déterminant une fois pour toutes le nombre de poids gradués qu'il faut mettre sur le plateau de l'instrument pour produire l'affleurement, soit 60 grammes par exemple, on n'a plus, pour connaître le poids du fragment à peser, qu'à le placer sur le plateau et à ajouter le nombre de poids nécessaire pour compléter l'affleurement; s'il faut mettre 40 grammes, le corps pèse évidemment 20 grammes. On fait ensuite passer le corps du plateau supérieur

sur le plateau inférieur. L'aréomètre se relève un peu et le nombre de poids qu'il faut ajouter pour rétablir l'affleurement est le poids de l'eau déplacée.

La tige qui rattache le plateau supérieur au corps de l'instrument doit être d'un très-petit diamètre si l'on veut que l'aréomètre soit sensible. On comprend en effet qu'une certaine variation dans la charge entraînant une variation correspondante dans le volume plongé, celle-ci sera accusée par un changement de niveau d'autant plus grand que la tige sera plus déliée.

Méthode du flacon. — La méthode employée le plus fréquemment est la méthode dite *du flacon* que nous allons exposer :

On prend un petit flacon en verre à large goulot, fermé, non point par un bouchon, mais par un simple disque obturateur en verre dépoli, usé sur les bords mêmes du flacon. Un bouchon aurait l'inconvénient de ne pas entrer toujours exactement de la même manière dans le goulot. L'obturateur est percé d'un petit trou au centre. On remplit le flacon d'eau pure de manière que l'eau fasse saillie au-dessus des bords du vase, comme cela arrive toujours pour un vase tout à fait plein ; puis on pose le disque sur le flacon. Si l'on enfermait par hasard de l'air sous la plaque de verre, il s'échapperait par le trou. On essuie alors avec grand soin le flacon ; on le pose sur le plateau d'une balance, et l'on met à côté un petit fragment du corps solide dont on veut déterminer la densité. On fait équilibre avec de la tare mise dans l'autre plateau, puis on retire le corps, et on le remplace par des poids qui rétablissent l'équilibre. Ces poids donnent le poids du corps, déterminé par la double pesée.

On retire alors ces poids et l'on remet le corps dans le plateau, non plus cependant à côté du flacon, mais dans le flacon même ; ce qui fait sortir une certaine quantité d'eau dont le volume est le même que celui du corps. Le flacon essuyé est placé dans le plateau. Il est évident qu'il manque ici pour l'équilibre le poids de l'eau qui est sortie ; on le compense par des poids qui donnent donc le poids

d'un volume d'eau égal au volume du corps. Il ne reste plus qu'à diviser pour avoir la densité.

Si 5^{gr},65 sont les poids mis à la place du corps,
1 ,45 les poids mis pour compenser l'eau sortie, la densité sera 5,65 divisé par 1,45 ou 3,89.

Quand le corps est en poudre et plus lourd que l'eau, l'opération se conduit de la même manière : seulement, on met, pour la première pesée, le corps dans un petit verre de montre placé sur le plateau à côté du flacon, puis, pour mettre le corps dans le flacon, on commence par enlever un peu d'eau, afin que l'entrée de la poudre dans le liquide n'en fasse pas sortir ; on comprend, en effet, que l'eau, en se déversant par dessus les bords, pourrait entraîner une petite quantité de poudre avec elle, si cette poudre est restée à la surface de l'eau, et cela arrive presque toujours, parce que l'air reste adhérent aux petits grains et leur fait alors déplacer un volume d'eau plus grand que le leur. Il faut, avant de faire la seconde pesée, placer le flacon sous la cloche de la machine pneumatique et faire le vide, pour forcer cet air adhérent à se détacher. Quand tous les grains sont réunis au fond, on achève de remplir le flacon, on le ferme, on l'essuie et on le met sur le plateau avec le verre de montre pour faire la seconde pesée.

Mais pour les poudres plus légères que l'eau, les difficultés sont beaucoup plus grandes, et il est à peu près impossible de déterminer exactement leur densité.

Enfin, si le corps pouvait se dissoudre dans l'eau, on serait obligé de prendre un détour. On déterminerait alors sa densité par rapport à celle d'un liquide dans lequel il ne serait pas soluble et dont on connaîtrait d'avance la densité, et il deviendrait alors facile de connaître la densité par rapport à l'eau. Ainsi, supposons que la densité du liquide par rapport à l'eau soit $\frac{1}{2}$, et que celle du corps par rapport au liquide en question soit 6 ; alors le corps pèserait 6 fois autant que le liquide auxiliaire sous le même volume ; mais comme l'eau pèse 2 fois autant que ce même liquide, il s'ensuit que la densité du corps par

rapport à l'eau serait seulement la moitié de 6, ou $6 \times \frac{1}{2}$, ou 3. Ainsi, en multipliant la densité du corps par rapport au liquide, par la densité du liquide, prise par rapport à l'eau, on aurait la densité du corps par rapport à l'eau. Si, par exemple, il s'agissait du sucre, on prendrait sa densité par rapport à celle de l'alcool pur en remplissant le flacon avec de l'alcool, et procédant comme nous l'avons dit. Cette densité serait ensuite multipliée par celle de l'alcool par rapport à l'eau.

Densité des liquides. — Pour les liquides, on pourrait employer des méthodes parallèles à celles que nous avons suivies pour les solides. Ainsi, on suspendrait un corps quelconque, une boule de verre, par exemple, au plateau de la balance ; puis, mesurant d'abord son poids dans l'air, on déterminerait ensuite sa perte de poids dans le liquide, et enfin sa perte de poids dans l'eau.

Poids dans l'air................	125 grammes,
Poids dans le liquide...........	118
Différence mesurant le poids du volume liquide déplacé 125—118=	7
Poids dans l'eau................	121
Différence donnant le poids de l'eau déplacée, 125—121=.........	4
Densité, 7 divisé par 4..........	1,75.

On peut aussi employer l'aréomètre de Farenheit, dont l'instrument de Nicholson décrit plus haut n'est qu'une modification. On le fait habituellement tout en verre, parce que le verre est inattaquable par la presque totalité des liquides. On lui donne la forme représentée ci-contre (fig. 51). La boule *b* est lestée avec du mercure. Le poids de l'instrument étant connu à l'avance (soit 200 grammes), on le plonge dans une éprouvette à pied pleine de liquide, et on ajoute sur le plateau la quantité de poids nécessaire pour obtenir l'affleurement du trait *a* avec la surface du liquide. Le poids total de l'appareil, en y comprenant la surcharge, représente, d'après la loi d'é-

quilibre des corps flottants, le poids du liquide déplacé. On plonge ensuite dans l'eau; et, par des poids mis en quantité convenable sur le plateau, on détermine de même l'affleurement. Le poids total sera maintenant le poids de l'eau déplacée. Divisant les deux nombres l'un par l'autre, on aura la densité demandée :

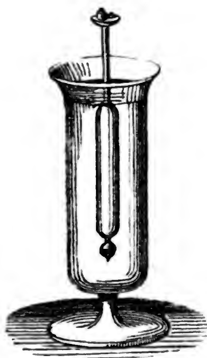


Fig. 51.

Poids de l'aréomètre..	200 gr.
Surcharge du plateau pour faire affleurer dans le liquide....	35
Surcharge du plateau pour faire affleurer dans l'eau........	70
Densité, 235 divisé par 270=............	0,87.

Pour appliquer la méthode du flacon, on remplit le petit flacon avec le liquide, on le met sur le plateau, et on le tare; puis on vide le liquide, on essuie le flacon, on le remet sur son plateau, et l'on ajoute la quantité de poids nécessaire pour équilibrer la tare. Ces poids donnent le poids du liquide que contenait le flacon. On remplit alors le flacon avec de l'eau, on le tare. On vide l'eau, on essuie le flacon, on le replace dans le plateau, et l'on complète par des poids la charge de ce plateau. Ces poids mesurent le poids de l'eau contenue dans le même flacon. En divisant les deux poids l'un par l'autre, on a la densité.

Aréomètres : pèse-sels, pèse-acides, pèse-esprits.— Dans le commerce, où l'on a besoin d'une appréciation rapide de la densité des liquides, les méthodes que nous venons de décrire seraient encore trop longues pour être applicables; on fait alors usage de très-petits instruments d'un emploi très-commode et que l'on appelle *aréomètres à poids constant.* Ils se composent tous d'un tube en verre *b*, soudé par sa partie inférieure à un cylindre de

plus fort calibre *a* lesté à sa partie inférieure par une boule *c*, contenant du mercure (fig. 52). L'appareil, entièrement creux, flotte dans le liquide, et il enfonce évidemment d'autant plus que le liquide est moins dense, puisque le poids du liquide déplacé doit toujours être égal au poids invariable de l'instrument. Le lest et la graduation changent avec la destination de l'instrument; s'il doit servir pour les liquides plus lourds que l'eau, les acides, les dissolutions salines par exemple, on le leste de telle sorte que dans l'eau pure il enfonce jusqu'au haut de sa tige. On marque alors un petit trait en ce point, qui sera le zéro de l'échelle, puis on fait une dissolution de 15 parties en poids de sel marin dans 85 parties d'eau. L'instrument plonge moins dans ce liquide que dans l'eau; on trace un trait au point d'affleurement. On transporte alors ces deux points sur une petite feuille de papier; on divise leur intervalle en 15 parties égales, et l'on poursuit la division au-dessous; on introduit ensuite le papier roulé dans la tige de l'aréomètre, de manière que les degrés 0° et 15° correspondent bien exactement aux traits tracés sur cette tige, et l'instrument est gradué. Pour les liquides plus légers que l'eau (vins, esprits), on fait une dissolution de 10 parties de sel dans 90 parties d'eau, et on leste l'instrument de telle sorte qu'il s'enfonce dans cette dissolution jusqu'à la naissance de sa tige : en ce point on marque 0°; puis on plonge dans l'eau l'aréomètre, qui s'y enfonce plus que dans la dissolution saline : au point d'affleurement on marque 10°, et l'on poursuit la division au-dessus. Ce système de graduation est celui des *aréomètres de Baumé*. Il a l'inconvénient d'être dissemblable pour les deux espèces d'aréomètres.



Fig. 52.

Dans les aréomètres Bataves, la graduation est une. Ainsi sur les deux échelles le zéro correspond à l'eau pure, le point d'affleurement de l'eau, marqué zéro, est au milieu de la tige; le trait 15° est marqué comme

dans le pèse-acide de Baumé, et la division est poursuivie au-dessus du zéro pour les liquides moins denses que l'eau, et au-dessous pour les liquides plus denses. On emploie encore en France l'aréomètre de Cartier, dont la graduation diffère peu de celle de Baumé ; leur zéro est le même, et le 30° de Cartier correspond au 32° de Baumé.

Toutes ces graduations sont arbitraires et ne donnent point les densités. L'aréomètre permet seulement de reconnaître si un liquide est à tel ou tel état de densité favorable pour une opération déterminée, sans donner le nombre même qui mesure cette densité. Ainsi le graveur à l'eau-forte sait qu'il doit employer l'acide nitrique à 26 du pèse-acide, mais il lui importe peu de connaître quelle est la densité de l'acide qui correspond à ce degré. De même quand le salpêtrier a évaporé par la chaleur ses eaux jusqu'à 45° du pèse-sel, il juge qu'il est temps de les retirer du feu pour les couler dans les vases où doit se faire la cristallisation du salpêtre, mais il n'a que faire de savoir la véritable densité de la dissolution saline.

Aréomètre centésimal ou volumètre. — A ces graduations de convention, M. Gay-Lussac a substitué le graduation suivante qui permet alors de connaître la densité. Il faut seulement que la tige de l'aréomètre soit exactement cylindrique, et que le volume de la partie renflée ne soit pas une fraction trop grande du volume total, pour laisser plus de course à l'instrument. La graduation se fera au moyen de trois liquides de densités connues : l'eau dont la densité est 1, un liquide dont la densité sera je suppose 2, enfin un troisième liquide dont la densité sera $\frac{1}{2}$. On prend un aréomètre à tige cylindrique, et on le leste de manière qu'il plonge dans l'eau jusqu'au sommet de sa tige, et au point d'affleurement on marque 100. Puis on plonge l'instrument dans le liquide de densité 2, et, comme le volume plongé doit être moitié moindre, au nouveau point d'affleurement, on marque 50 ; on divise l'intervalle en 50 parties égales ; et l'on poursuit la division au-dessous. Si maintenant l'instrument plonge au trait 75 dans un liquide de densité inconnue, sa densité sera par rapport à l'eau $\frac{100}{75}$. — Car si le liquide était tel que l'aréomètre au lieu de plonger du volume 100 plongeât du

volume 1, cela indiquerait que sa densité serait 100 fois celle de l'eau, puisqu'un volume 100 fois plus petit pèserait toujours le même poids, c'est-à-dire le poids de l'aréomètre. Mais le volume plongé n'est pas 1, il est 75; la densité n'est donc pas 100, mais $\frac{100}{75}$. — On pourrait immédiatement, et c'est même ce que l'on fait ordinairement, écrire en face de chaque division marquée 100 ou 80, ou 75, ou 50, la densité correspondante : 1, $\frac{100}{80} =$ 1,25,... $\frac{100}{75} =$ 1,33 $\frac{100}{50} =$ 2, etc.

Pour les liquides moins denses que l'eau, on leste l'instrument de telle sorte qu'il plonge dans l'eau à la naissance de la tige, et on marque encore à l'affleurement 100. — Puis on le plonge dans le liquide de densité $\frac{1}{2}$; le volume déplacé devant être double, on marque 200 au point d'affleurement, et l'on divise l'intervalle en 100 parties égales. — Puis aux points de division 120,.... 150,.... 180,.... on marque les densités correspondantes $\frac{100}{120} =$ 0,83 $\frac{100}{150} =$ 0,66 $\frac{100}{180}$ — 0,555, etc.

Alcoomètre. — Pour apprécier la richesse des esprits en alcool pur, M. Gay-Lussac a employé un mode particulier de graduation de l'aréomètre. Il leste l'instrument de telle sorte que dans l'alcool pur il enfonce jusqu'au sommet de sa tige, puis il compose une série de liqueurs alcooliques contenant 95 pour 100, 90 pour 100, 85 pour 100, 80 pour 100, etc., etc., d'alcool. Il marque alors aux points d'affleurements de l'aréomètre dans les liqueurs 95, 90, 85, 80, etc., et divise en 5 parties égales les intervalles des traits d'affleurement. L'instrument, gradué de cette manière, donne alors la proportion d'alcool en centièmes. Ainsi gradué, l'aréomètre prend le nom d'*alcoomètre centésimal.* Ce mode de division peut s'appliquer aux instruments destinés à mesurer la richesse des vinaigres, des potasses, etc.

TABLE DES DENSITÉS.

Corps solides.

Platine en lames........	22,60	Argent.................	10,50
— en fils	21,	Cuivre en fil............	8,88
Or.....................	19,30	Laiton	8,39
Plomb	11,35	Arsenic	8,31

Acier	7,82	Ivoire	1,92
Fer en barres	7,79	Phosphore	1,77
Étain	7,29	Houille	1,33
Zinc	6,86	Glace	0,94
Diamant	3,50	Hêtre	0,86
Verre-cristal	3,33	If	0,81
Verre ordinaire	2,50	Sapin	0,66
Marbre statuaire	2,34	Peuplier	0,38
Porcelaine	2,30	Liége	0,24
Soufre	2,03		

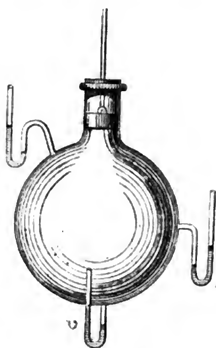
Corps liquides.

Mercure	13,60	Eau de mer	1,03
Acide sulfurique	1,84	Vin de Bordeaux	0,99
— nitrique	1,22	Essence de térébenthine.	0,870
Lait	1,03	Alcool pur	0,754
Éther	0,735	Huile d'olive	0,815

CHAPITRE VI.

PESANTEUR DES GAZ — BAROMÈTRE.

Le principe de l'égalité de pression est applicable aux gaz aussi bien qu'aux liquides, à cause de leur grande élasticité et de la mobilité de leurs particules. Ici la preuve directe est plus facile à obtenir par l'expérience, parce que les gaz ayant une très-faible densité, les pressions, dues au poids des couches gazeuses contenues dans un vase de petites dimensions, sont tellement insignifiantes qu'elles disparaissent devant la pression artificielle, pourvu que celle-ci soit un peu énergique. Ainsi, si on prend un ballon muni d'un col cylindrique dans lequel s'engage à frottement un piston (fig. 53); si en outre le ballon est percé en différents points de sa paroi de petites ouvertures de même diamètre auxquelles sont mastiqués des tubes en verre, recourbés comme l'indique la figure ci-contre, et contenant du mercure dans leur courbure, on verra qu'une pression exercée sur le piston aura pour effet de déplacer les niveaux de la même manière dans tous ces tubes.


Fig. 53.

Force élastique des gaz. — Nous avons donné comme caractère distinctif des corps gazeux la tendance à occuper sans cesse un plus grand volume. Quand un gaz est enfermé dans un vase, il doit donc, par le fait même de cette tendance constante à l'expansion, exercer une pression sur les parois du vase. C'est là ce que l'on appelle sa *tension* ou sa *force élastique*.

Puisque le gaz tend sans cesse à occuper un plus grand volume, on peut se demander comment il se fait qu'un flacon ouvert conserve l'air qui y est contenu. Mais en même temps que l'air du flacon tend à en sortir, l'air du dehors tend au contraire à pénétrer dans le flacon; alors la couche gazeuse placée à l'orifice, pressée dans les deux sens, peut rester immobile, et par suite aussi l'air du flacon. L'élasticité du gaz intérieur est alors équilibrée par la pression extérieure. J'ai dit : *peut rester immobile*, parce qu'il peut aussi très-bien arriver que l'une ou l'autre des deux forces l'emporte : alors il sortira un peu d'air du flacon, où il en entrera un peu jusqu'à ce que l'équilibre se soit établi.

Nous pouvons dire, d'une manière générale, que dans une masse gazeuse en repos l'élasticité est égale à la pression extérieure, et de plus que si cette condition n'est pas remplie, l'équilibre n'a pas lieu. Si en effet la pression est plus grande que la force élastique, alors les particules gazeuses se rapprocheront. Mais de même que la réaction élastique d'un ressort est d'autant plus grande qu'on le fléchit davantage, de même aussi l'élasticité d'un gaz est d'autant plus grande qu'on le resserre sous un plus petit volume; on s'en aperçoit bien dans la manœuvre du briquet à air : plus le piston s'approche du fond du cylindre, et plus on a de peine à l'en rapprocher encore. Il suit de là que la réduction du volume du gaz aura pour effet, en augmentant l'élasticité, de l'amener à être égale à la pression, et alors la compression s'arrêtera, et la masse gazeuse se trouvera constituée en équilibre.

L'air est pesant. — En commençant ce chapitre, nous avons, dans le premier paragraphe, fait entendre que nous considérions l'air comme un corps pesant; nous avons d'autant moins hésité à l'admettre qu'il est entré dans le langage vulgaire de dire que l'air est lourd ou qu'il est léger. On n'a cependant pas toujours pensé ainsi, et pendant bien longtemps on a regardé l'air comme un corps non pesant. C'est à Galilée que l'on doit d'avoir démontré

pour la première fois, par une expérience directe, que l'air et tous les gaz sont soumis, tout aussi bien que les liquides et les solides, à l'action de la pesanteur.

Voici comment nous ferons cette expérience capitale. Nous prendrons un ballon de verre d'une capacité de 7 à 8 litres, muni d'une garniture en cuivre à robinet (fig. 54). Le robinet ayant d'abord été ouvert pour mettre le ballon en communication avec l'air du dehors, puis fermé pour interrompre cette communication, on suspend le ballon

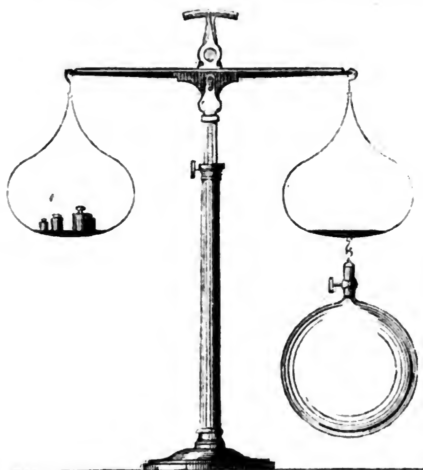


Fig. 54.

à l'un des plateaux de la balance hydrostatique, et l'on met de la tare de l'autre côté, pour amener le fléau à l'équilibre horizontal. Cela fait, on détache le ballon et l'on y fait le vide à l'aide de la machine pneumatique; puis on le suspend de nouveau au plateau, et l'on voit alors que le fléau ne reprend plus sa position d'équilibre, et que la charge du plateau qui porte le ballon est trop faible. Donc l'air retiré du ballon est un corps pesant. Pour savoir ce qu'il pèse nous n'avons qu'à ajouter des poids dans le plateau de manière à rétablir l'équilibre.

La somme de ces poids équivaut au poids de l'air retiré. Si au lieu de mettre des poids nous laissions, en ouvrant le robinet, l'air rentrer dans le ballon, l'équilibre se rétablirait de la même manière.

Le volume du ballon étant connu en litres, on diviserait le poids de l'air par ce nombre de litres, et l'on aurait de cette manière le poids d'un litre d'air. Ce poids est, à Paris, environ 1 gramme 3 décigrammes, quand l'air est pris dans l'atmosphère ou dans une chambre en communication libre avec le dehors.

L'expérience peut se faire de la même manière avec un gaz quelconque et donne le même résultat, sauf la différence dans le poids du litre de gaz.

Pression de l'atmosphère. — Puisque l'air est pesant, l'atmosphère qui enveloppe la terre doit exercer par son poids une pression sur la surface du sol, et sur tous les objets en contact avec elle. Cette pression se mesure, comme celle qu'exerçent les liquides, par le poids de la colonne verticale ayant pour base la surface pressée et montant jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère.

Ainsi la surface horizontale de l'eau placée dans un verre supporte en tous ses points la même pression de la part de l'atmosphère. Si l'on vient à poser sur la surface du liquide le bord d'une cloche pleine d'air (fig. 55), cet air, se trouvant avoir une élasticité égale à la pression qu'exerce l'air du dehors, produira par son élasticité sur la surface *ab* du liquide une pression égale à celle que l'air exerçait par son poids, et rien ne sera changé à l'état du liquide. Mais si l'on vient à supprimer par un moyen quelconque l'air qui remplit la cloche, la pression exercée sur la surface liquide *ab* de haut en bas, sera supprimée en même temps; l'équilibre est donc rompu, puisque tous les points de la surface libre horizontale ne supportent plus la même pression. La pression atmosphérique, exer-

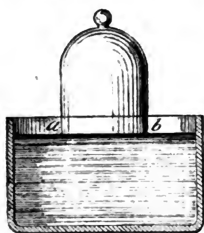


Fig. 55.

cée sur les portions de cette surface extérieure à la cloche, se transmet dans le liquide dans tous les sens; ainsi la surface *ab* est poussée de bas en haut, alors le liquide montera dans la cloche. Au fur et à mesure qu'il s'élève, il presse par son poids sur la surface *ab*, et quand cette pression sera devenue égale à celle qu'exerçait l'air enlevé, c'est-à-dire à la pression atmosphérique, alors la colonne liquide se fixera et l'équilibre sera établi.

Supposons que la colonne liquide s'élève ainsi à 1 mètre de hauteur dans la cloche; cela voudra dire que la pression exercée par l'atmosphère sur la base de cette colonne, quelle que soit son étendue, est équivalente au poids d'une colonne du liquide en question ayant cette même base et 1 mètre de hauteur. Si donc nous prenons un tube de $1^{m},50$ de longueur, fermé à une de ses extrémités, et rempli complétement avec le liquide en expérience, et si nous le renversons en le bouchant avec le doigt dans une terrine pleine de ce même liquide, dès que nous ôterons le doigt la colonne liquide descendra, jusqu'à ce qu'elle n'ait plus qu'un mètre de hauteur (fig. 56). Tant qu'elle est plus haute, en effet, elle l'emporte sur la pression atmosphérique transmise de bas en haut en *ab;* mais elle ne saurait être moindre, car alors ce serait la pression atmosphérique qui l'emporterait et ferait remonter le liquide.

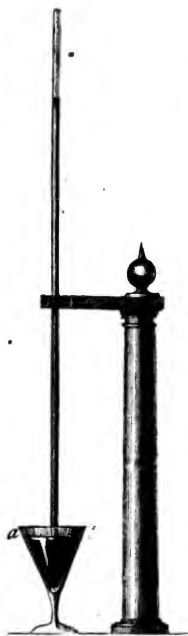


Fig. 56.

Cette dernière expérience fut faite pour la première fois en 1643 par *Torricelli*, élève de *Galilée*. On expliquait à cette époque l'ascension de l'eau dans les pompes en disant que le piston de la pompe enlevait l'air au-dessous de lui, et que, *comme la nature avait horreur du vide*, l'eau montait pour le remplir. Des fontainiers de Florence,

ayant à élever les eaux de l'Arno à une grande hauteur, reconnurent que par l'aspiration du piston l'eau ne pouvait s'élever à plus de 32 pieds. Galilée, consulté à ce sujet, et préoccupé alors d'autres travaux, répondit en plaisantant que la *nature n'avait horreur du vide que jusqu'à* 32 *pieds*, mais il laissa à Torricelli le soin de trouver la véritable explication du phénomène. Galilée ayant démontré que l'air était pesant, Torricelli se trouvait naturellement conduit à mesurer la pression que l'air exerce par son poids, et il le fit en procédant comme nous l'avons dit tout à l'heure. Remplissant de mercure bien pur un tube de verre d'un mètre de longueur et le renversant dans un verre plein du même liquide, il vit le niveau s'arrêter dans le tube à 28 pouces au-dessus du niveau dans le verre. Cette hauteur de 28 pouces ($0^m,76$) mesure donc la pression atmosphérique, c'est-à-dire que la pression que l'atmosphère exerce sur une surface d'un centimètre carré équivaut à celle qu'exercerait sur cette même surface une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur. Le volume de cette colonne se compose évidemment de 76 centimètres cubes. La densité du mercure étant 13,6, le centimètre cube de mercure pèse $13^{gr},6$; le poids de la colonne sera donc 76 fois $13^{gr},6$ ou $1033^{gr},6$, un peu plus d'un kilogramme. Or, il est évident que, pour peser le même poids, une colonne d'eau d'un centimètre carré de base, comme la colonne de mercure, doit avoir 10 mètres 33 centimètres de hauteur, ce qui représente 31 pieds $\frac{7}{10}$, environ 32 pieds.

Les hauteurs de liquides de densités différentes qui feront équilibre à la pression atmosphérique doivent être en raison inverse de leurs densités. C'est ce que nous venons de trouver pour l'eau et le mercure, c'est ce que l'on trouverait de même pour tout autre liquide. Le fait avait tant d'importance, comme preuve de la pression atmosphérique, qu'à plusieurs reprises on en a fait des vérifications expérimentables. Ainsi, à Rouen, Pascal, l'auteur des *Pensées* et des *Provinciales*, fit remplir de vin, dont la densité est, à peu de chose près, la même que celle de

l'eau, un tube de 15 mètres de hauteur ; puis le retournant dans un bassin plein d'eau, comme Torricelli l'avait fait avec son tube à mercure, il vit la colonne se fixer à 32 pieds. Une autre expérience peut-être plus convaincante encore fut faite par lui au Puy-de-Dôme. Si la pression atmosphérique, pensa Pascal, est la cause de l'ascension du liquide dans le tube, dès l'instant où l'on s'élèvera dans l'air à une certaine hauteur, à 500 mètres par exemple, la pression devra diminuer de celle qu'exercerait l'air qu'on laisse au-dessous de soi, et la colonne liquide aura par conséquent une hauteur moindre. Il fit alors établir un tube de Torricelli plein d'eau au pied du Puy-de-Dôme, et laissa auprès de ce tube une personne pour s'assurer que la hauteur du liquide dans ce tube demeurait invariable; puis un autre tube semblable fut dressé à moitié chemin du sommet du Puy-de-Dôme, et l'on constata un abaissement de plusieurs centimètres. Enfin, quand l'appareil fut établi sur le sommet même, la différence fut encore plus marquée. Depuis Pascal, cette expérience a été faite bien des fois sur tous les points du globe, et l'instrument de Torricelli est même devenu comme une règle avec laquelle on mesure la hauteur des montagnes. On n'aura pas de peine à comprendre comment. Si on supprime la pression d'une colonne d'air d'une certaine hauteur, le mercure du tube de Torricelli, qui est 10 450 fois plus dense que l'air, devra s'abaisser d'une quantité 10 450 fois plus petite que cette hauteur, et réciproquement quand on aura constaté que le mercure descend d'un certain nombre de centimètres en passant du pied de la montagne à son sommet, on n'aura qu'à prendre 10 450 fois cette différence pour avoir la hauteur de la colonne d'air, c'est-à-dire celle de la montagne, Ainsi, mettons qu'au bas la pression soit $0^m,75$, en haut $0^m,69$. La différence de hauteur des deux stations sera $0^m,06 \times 10\,450$ ou 627 mètres.

Ce calcul n'est pas tout à fait exact, parce que la densité de l'air ne reste pas la même à toutes les hauteurs. Elle va en diminuant au fur et à mesure que l'on s'élève,

et cela est naturel, l'air étant de moins en moins comprimé puisque la pression devient plus faible. On trouve dans l'*Annuaire des Longitudes* des Tables qui permettent de faire les corrections nécessaires.

On évalue à 14 ou 15 lieues la hauteur de notre atmosphère. Cette hauteur qui nous paraît considérable quand nous la comparons à notre propre grandeur et à celle des objets qui nous entourent, est cependant bien peu de chose par rapport au rayon de la terre, qui est d'environ 1432 lieues. Sur une sphère de 1 mètre de rayon, l'atmosphère serait représentée par une couche de 1 centimètre d'épaisseur. Dans une masse gazeuse aussi énorme en contact avec le sol de contrées très-inégalement chaudes, l'équilibre est impossible. Aussi l'air est-il presque continuellement en mouvement, et c'est précisément ce mouvement de transport des masses d'air d'un point à un autre qui constitue ce que l'on appelle les vents. La densité de l'air, et par suite la pression qu'il exerce par son poids, en un point donné du globe, sont incessamment variables. Nul instrument n'est plus propre que le tube de Torricelli pour apprécier ces variations. On le désigne plus ordinairement sous le nom de *baromètre*.

Baromètre. — On prend un tube de verre cylindrique de 1 mètre à peu près de longueur et de 1 centimètre de diamètre intérieur ; on le ferme à une extrémité et l'on étire un peu en pointe l'autre extrémité, puis on remplit le tube de mercure, et, en le disposant dans une position inclinée au-dessus d'un fourneau, on fait bouillir le liquide, pour chasser l'air et l'humidité qui adhèrent au verre. Cette précaution est tout à fait indispensable, car il ne faut pas qu'il y ait au-dessus du mercure de fluide gazeux qui, par son élasticité, puisse exercer une pression sur le liquide. On ferme alors l'orifice du tube avec l'index, et, retournant le tube, on plonge la pointe dans une cuvette pleine de mercure. On dresse enfin le tube avec sa cuvette le long d'une planche en bois verticale. Il ne reste plus qu'à établir une échelle en millimètres le long de la colonne. Cette échelle a pour point de départ le niveau du

mercure dans la cuvette. Comme dans un même lieu le niveau du mercure dans le tube ne varie que dans une étendue assez restreinte, on se borne à tracer la partie supérieure de l'échelle comprenant les divisions depuis 725 millimètres jusqu'à 795 environ.

C'est là ce que l'on appelle le *baromètre à cuvette.*

Il présente un inconvénient assez grave. Puisque les divisions de l'échelle partent du niveau du mercure dans la cuvette, il faudrait que ce niveau fût invariable, ce qui n'a pas lieu ; car, lorsque la colonne s'élève dans le tube, le niveau s'abaisse nécessairement dans la cuvette, et, au contraire, lorsque la colonne s'abaisse, son mercure, rentrant dans la cuvette, y élève le niveau.

Baromètre de Fortin.—Fortin a remédié à cette cause d'erreur en construisant des cuvettes à fond mobile. Ce fond est formé par une peau de chamois qui repose sur un disque que l'on fait monter ou descendre à volonté à l'aide d'une vis engagée dans le fond de la garniture métallique qui enveloppe la cuvette dans sa partie inférieure (fig. 57).

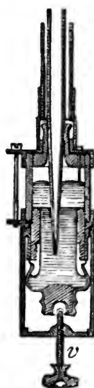


Fig. 57.

La cuvette elle-même se compose d'un tube en cristal maintenu entre deux garnitures métalliques que trois tiges munies d'écrous rapprochent fortement. Dans la partie inférieure du tube de verre s'engage un étui de bois, vissé sur la garniture métallique inférieure, et qui présente une gorge sur laquelle se trouve fixée la peau qui constitue le fond mobile. Cette peau se resserre en forme de goulot et entoure un disque en bois sur lequel elle est liée au moyen d'une corde. La garniture métallique qui enveloppe toute cette partie de la cuvette porte une vis sur la pointe de laquelle pose ce disque, que l'on peut ainsi soulever ou abaisser à volonté, en tournant la tête extérieure de la vis dans le sens convenable. Enfin à la garniture supérieure est adaptée une pointe d'ivoire dont l'extrémité, visible à travers le tube de cristal, est le point de départ de l'échelle. Chaque fois

que l'on veut faire une observation de hauteur on fait mouvoir la vis de manière à amener le mercure un peu au-dessous de la pointe; on voit alors l'image de cette pointe par réflexion, et l'on fait remonter le niveau jusqu'à ce que la pointe et son image se trouvent bout à bout; le mercure est alors à l'affleurement. Il ne reste plus qu'à lire la division de l'échelle en face de laquelle se trouve le sommet de la colonne mercurielle. Pour faciliter la lecture, un petit curseur mobile est adapté à l'échelle et glisse dans une rainure à crémaillère. On l'amène à l'affleurement du mercure, et on prend le numéro de la division indiquée par sa pointe.

Le tube du baromètre de Fortin est ordinairement entouré d'un étui en laiton qui se rattache à la garniture de la cuvette et préserve le verre des chocs extérieurs. C'est sur cet étui même qu'est tracée l'échelle métrique. Un rouet en peau de chamois, lié à la fois au col de la cuvette et au tube barométrique, empêche le mercure de sortir de l'instrument et les poussières d'y pénétrer, sans intercepter toutefois, grâce à sa porosité, la communication de l'air du dehors avec celui de la cuvette. En soulevant enfin avec la vis le fond de peau, on remplit de mercure complétement la cuvette et le tube; ainsi disposé, le baromètre peut être transporté en voyage sans inconvénient.



Fig. 58.

Baromètre à siphon. — Il est encore une espèce de baromètre également très-employé et connu sous le nom de *baromètre à siphon*.

Il se compose d'un tube à deux branches d'inégales longueurs recourbées parallèlement. La branche longue est fermée; la plus courte, ouverte, est en communication libre avec l'air. L'appareil se remplit de mercure comme le tube de Torricelli; puis on le retourne dans la position indiquée par la figure 58. Les deux niveaux du liquide se fixent alors à une distance égale à la hauteur de la colonne dans le baromètre à cuvette, le poids de la colonne *ac* faisant équilibre sur la couche

horizontale *ab* à la pression atmosphérique qui s'exerce en *b*. Le tube est dressé le long d'une tablette verticale munie d'une échelle pour chaque branche. La division commence pour les deux échelles au point *m*. Pour mesurer la hauteur barométrique, on prend la hauteur *mc*, la hauteur *mb*, et l'on fait la différence des deux nombres.

Baromètre de Gay-Lussac. — M. Gay-Lussac a apporté à la construction du baromètre à siphon d'importants perfectionnements, surtout dans le but de le rendre facile à transporter et d'en faire un instrument de voyage.

Tous les baromètres à cuvette ont un inconvénient commun, qui tient à une cause générale dont nous dirons en passant quelques mots.

Il est des liquides qui mouillent le verre ; d'autres qui ne le mouillent point. — Pour les liquides de la première catégorie, parmi lesquels nous citerons l'eau, l'alcool, etc., voici ce qui résulte de cette espèce d'attraction du solide sur le liquide.

1° Dans un vase de verre la surface de l'eau n'est pas entièrement plane; la région voisine de la paroi prend une forme concave en s'élevant le long de cette paroi. Dans un vase d'un centimètre de diamètre seulement, la partie plane de la surface n'existe plus; cette surface a sensiblement la forme d'une calotte sphérique concave.

2° Le principe des vases communiquants est en défaut si l'un des deux vases a un très-petit diamètre : — Alors les deux niveaux ne sont plus à la même hauteur. Le niveau est plus élevé dans le vase étroit, et la distance des niveaux est d'autant plus grande que le diamètre est plus petit. Ainsi, lorsqu'on plonge dans l'eau un tube dont le diamètre intérieur est fin comme un cheveu (un tube *capillaire*), on voit le niveau s'élever à plusieurs décimètres dans ce tube.

Pour les liquides de la seconde catégorie, le mercure, par exemple, c'est l'inverse qui se produit.

1° Dans un vase de verre la surface du mercure se déprime dans le voisinage des parois et s'abaisse au-dessous du niveau de la région centrale. Dans un vase d'un centimètre de diamètre, la surface n'aurait plus de partie plane et présenterait la forme d'une calotte sphérique convexe.

2° Si l'un des deux vases communiquants à un très-petit dia-

mètre, les deux niveaux ne sont plus à la même hauteur; le niveau est déprimé dans le vase étroit, et d'autant plus que le diamètre de ce vase est plus petit.

Il doit y avoir d'après cela une dépression dans la colonne mercurielle du tube barométrique, c'est-à-dire que la colonne doit avoir une hauteur moindre que si le tube avait de 4 à 5 centimètres de diamètre.

Des tables particulières, appelées tables de capillarité, donnent la valeur numérique de cette dépression pour les différentes grandeurs du diamètre du tube barométrique.

Ces corrections deviennent inutiles dans le baromètre à siphon si les deux branches y sont d'égal diamètre; car dans ce cas l'influence de la *capillarité* (c'est le nom que l'on donne à cette force moléculaire qui rompt les lois ordinaires de l'hydrostatique) sur les deux niveaux est égale et opposée, et dès lors les effets s'annulent. Aussi cette égalité de diamètre est-elle une des conditions de construction du baromètre de Gay-Lussac. — Pour que le tube barométrique suspendu par l'extrémité de sa longue branche puisse avoir ses deux branches verticales, on lui donne la forme indiquée par la figure 59; de telle sorte que le centre de gravité de la masse totale soit dans l'axe du grand tube. — Les deux branches ont environ 1 centimètre ou 1 centimètre et demi de diamètre. Le tube plus étroit qui les relie l'une à l'autre, et qui est rejeté un peu de côté, a environ $\frac{1}{2}$ centimètre. Il ne faut pas le faire trop étroit, pour éviter d'augmenter le frottement du mercure sur les parois, ce qui diminuerait la sensibilité de l'instrument. La petite branche ne communique avec l'extérieur que par un très-petit trou dont les bords font saillie en forme de pointe à l'intérieur du tube. En retournant l'instrument sens dessus dessous avec précaution, la grande branche se trouve complétement pleine; l'excédant de mercure tombe en *a* (fig. 60), et l'air ne peut aller se loger dans la chambre de Torricelli. — Pour éviter plus sûrement cette rentrée de l'air, M. Bunten a formé le tube de raccord de deux petits tubes soudés l'un dans l'autre comme l'indique

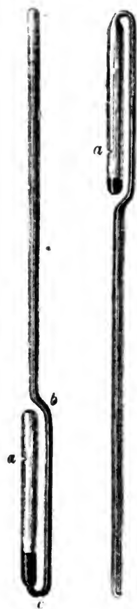


Fig. 59. Fig. 60.

la figure 61. Grâce à cette disposition, si l'air pouvait, en divisant le mercure, pénétrer par le point *c* dans la branche de raccord, cet air se trouverait arrêté par la saillie de la pointe, et, suivant les parois, viendrait se loger dans l'espace fermé, où il pourrait être regardé comme formant paroi lui-même.

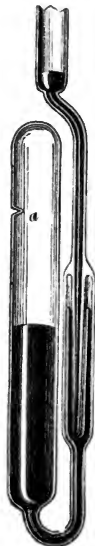


Fig. 61.

Enfin le tube barométrique est enveloppé, comme le baromètre de Fortin, dans un étui en cuivre percé de deux fentes en regard, à la branche supérieure, et à la branche inférieure, pour laisser voir les niveaux du mercure. C'est sur cet étui que se trouve tracée la division.

Pour mettre l'instrument en expérience, il suffit de le suspendre par un anneau adapté à sa grande branche. Le trépied qui porte l'instrument en observation peut ensuite se replier de manière à envelopper le baromètre que l'on a préalablement retourné. Le tout s'enferme dans un étui en cuir que l'observateur peut impunément porter en bandoulière. La manœuvre est la même pour le baromètre de Fortin.

Le tube de Fortin et celui de Gay-Lussac portent un thermomètre dont nous ferons plus tard comprendre l'utilité.

Baromètre à cadran (fig. 62). — Le baromètre à cadran n'est autre chose qu'un baromètre à siphon dissimulé derrière un cadran en bois assez élevé pour le cacher complétement. Sur le mercure de la petite branche flotte une petite masse de fer suspendue à un fil. Ce fil s'enroule sur la gorge d'une poulie très-mobile. Une seconde gorge de la même poulie porte un autre fil enroulé en sens inverse et soutenant un petit contre-poids. Au centre de la poulie est fixé un pivot qui traverse le cadre en bois et porte de l'autre côté une aiguille qui tourne sur un cercle divisé. Lorsque le mercure descend dans la petite branche, ce qui suppose qu'il monte dans la grande, le flotteur en fer descend avec lui, et, tirant le fil, fait tourner la poulie et l'aiguille dans un certain sens. Lorsque, au contraire,

le mercure remonte dans la petite branche et par conséquent descend dans la grande, le flotteur remonte également. Alors le contre-poids à son tour fait tourner la poulie et l'aiguille dans le sens inverse. Les dimensions de la poulie sont déterminées de telle sorte que l'aiguille fasse un tour sur le cercle lorsque le mercure va du point le plus bas qu'il peut atteindre au point le plus élevé. Le baromètre à cadran, dont l'invention est due à Jecker, est au surplus un instrument fort imparfait et sur les indications duquel on ne peut guère compter.

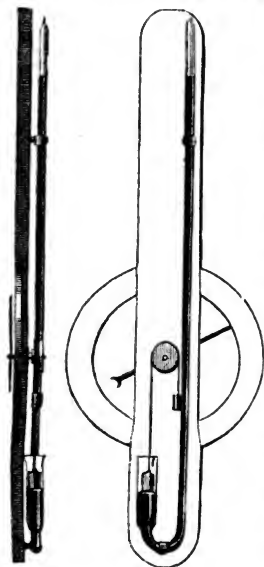


Fig 62.

On a remarqué qu'un temps très-sec faisait monter le baromètre; qu'au contraire par la pluie ou par un temps humide, le baromètre descendait; qu'un vent violent avait *généralement* pour effet de faire descendre brusquement la colonne mercurielle. Aussi a-t-on souvent recours au baromètre pour préjuger du temps qu'il fera, et les baromètres d'appartement portent sur leur échelle les indications : très-sec, beau fixe, beau, variable, pluie ou vent, tempête, correspondant sur les baromètres construits à Paris aux hauteurs :



Très-sec..........	0m,785
Beau fixe.........	0m,776
Beau.............	0m,767
Variable.........	0m,758
Pluie ou vent......	0m,749
Grande pluie......	0m,740
Tempête..........	0m,731

Il ne faut pas apporter trop de confiance dans ces in-

dications, qui sont souvent en défaut et qui tiennent tout à fait aux conditions du climat. Les vents qui nous viennent du sud sont des courants d'air mêlés de vapeur d'eau, plus légers que l'air sec : aussi font-ils baisser le baromètre en même temps qu'ils nous apportent la pluie. Au contraire, les vents du nord sont secs et font monter le baromètre. Le contraire aurait lieu pour des pays qui auraient au nord de vastes étendues de mer.

Indépendamment de ces variations accidentelles, le baromètre éprouve des variations régulières et périodiques, surtout dans les contrées équatoriales. Ainsi, la hauteur barométrique va progressivement en décroissant depuis neuf heures du matin jusqu'à trois de l'après-midi, puis elle augmente à partir de ce moment jusqu'au soir. Dans les régions tempérées ces périodes sont beaucoup moins marquées.

En faisant trois observations, à 9^h du matin, à 3^h de l'après-midi et à 9^h du soir, les ajoutant et prenant le tiers de la somme, on a ce que l'on appelle la moyenne barométrique du jour. En ajoutant les moyennes des 30 jours du mois, et divisant leur somme par 30, on a la moyenne du mois. Enfin, en ajoutant les 12 moyennes mensuelles et divisant par 12, on a la moyenne de l'année. Les moyennes annuelles à Paris diffèrent extrêmement peu l'une de l'autre. En ajoutant ensemble les moyennes d'un certain nombre d'années consécutives, et divisant la somme par le nombre des années, on a trouvé, pour moyenne barométrique de Paris : 756 millimètres.

CHAPITRE VII.

LOI DE MARIOTE. — TRANSVASEMENT DES GAZ.

Lorsque, par un moyen quelconque, on fait varier le volume d'un corps, quel qu'il soit, on change en même temps sa densité. Si le volume devient double, la même quantité de matière doit être répartie dans un volume double, il est clair que dans le volume primitif il n'y a plus que la moitié de la masse qui l'occupait d'abord. Il en résulte que la densité est réduite à moitié. C'est ce qu'on exprime en disant que la densité est en raison inverse du volume; ceci s'applique aux gaz, comme aux liquides et aux solides.

Nous savons aussi que, lorsqu'une masse gazeuse est en équilibre, son élasticité est égale à la pression qu'elle supporte. Lors donc que nous saurons comment varie avec la pression le volume de cette masse gazeuse, nous saurons par cela même comment varient et son élasticité et sa densité.

Loi de Mariote.—Mariote a démontré que les volumes que prend, à une même température, une même masse d'un gaz quelconque, soumise à des pressions différentes, sont en raison inverse de ces pressions.

Pour cette démonstration, on prend un tube analogue pour sa forme au baromètre à siphon, mais ayant sa longue branche ouverte et sa branche courte fermée (fig. 63). On commence par verser une petite quantité de mercure, suffisante pour séparer les deux branches; et en inclinant l'appareil tantôt à gauche, tantôt à droite, on fait entrer de l'air dans la petite branche, ou l'on en fait sortir, de manière à amener les deux niveaux sur un même plan horizontal *ab*. Comme l'équilibre n'a lieu qu'à la condition que tous les points de cette couche *ab* supportent la

même pression, on en conclut que la pression que le gaz renfermé dans l'espace *am* exerce en *a*, en vertu de son élasticité, est égale à la pression que l'air exerce en *b* en vertu de son poids. Ainsi l'élasticité de cette masse de gaz est égale à la pression atmosphérique, pression dont on peut avoir la valeur en prenant la hauteur barométrique. Une échelle graduée est établie le long de la petite branche, et ses divisions correspondent à des parties d'égale capacité dans le tube fermé. Une seconde division en centimètres et millimètres est tracée le long de la grande branche. On introduit alors du mercure par cette branche ouverte jusqu'à ce que le nombre des divisions occupées par l'air soit réduit à moitié. Soient *e* le niveau du mercure dans la petite branche, et *d* le niveau dans la grande.



Fig. 63.

L'équilibre exige que tous les points de la couche horizontale *ce* supportent la même pression. Ainsi, la pression en *e* est la même qu'en *c*. Or, en *c* la pression se compose de la pression atmosphérique qui s'exerce librement en *d*, et se transmet sans altération par l'intermédiaire de la masse liquide au point *c*, puis de la pression due à la colonne *dc*; en mesurant sur l'échelle en centimètres la hauteur de cette colonne *dc* on la trouve égale à la hauteur de la colonne barométrique; la pression en *c*, et par suite en *e*, est donc de deux pressions atmosphériques, ou, pour parler plus brièvement, de deux atmosphères. Ainsi l'on voit que, par l'effet d'une pression double, le volume se trouve réduit à moitié. Si les dimensions de la grande branche le permettent, on versera du mercure de manière à réduire le volume du gaz au tiers de ce qu'il était primitivement. On trouvera alors que la différence des niveaux dans les deux branches est de deux fois la hauteur barométrique; en y ajoutant la pres-

sion qui s'exerce à la surface libre du mercure, on aura pour mesure de la pression trois atmosphères. Donc, quand la pression devient triple, le volume de la masse gazeuse devient trois fois plus petit.

Il serait difficile, avec l'appareil que nous venons de décrire, de pousser plus loin la vérification de la loi : le poids du mercure ferait briser le tube. Sans rien changer à la forme générale de l'appareil, MM. Dulong et Arago ont, par d'ingénieuses dispositions, montré que la loi de Mariote se vérifiait, au moins pour l'air, même sous de très-fortes pressions.

Leur appareil (fig. 64) se composait d'une caisse en fonte, portant à sa partie inférieure un appendice tubulaire latéral, sur lequel se trouvaient montés : 1° un tube *ab* fermé à sa partie supérieure et jouant le rôle de la petite branche du tube de Mariote; 2° une série de tubes de cristal, ayant chacun un mètre de hauteur, superposés et solidement ajustés les uns aux autres. C'était là la grande branche du tube de Mariote. La caisse en fonte était pleine de mercure, et au moyen d'un piston établi à sa partie supérieure, on refoulait le mercure dans les tubes, au lieu de le verser par l'orifice supérieur *m*.

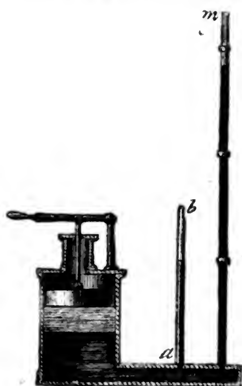


Fig. 64.

Des précautions minutieuses assuraient l'exactitude la plus parfaite, tant pour la mesure du volume occupé par le gaz dans le tube fermé, que pour la mesure de la différence des niveaux.

Ces expériences ont établi que la loi de Mariote se maintenait exacte pour l'air jusqu'à vingt-sept atmosphères.

Pour des pressions moindres que la pression atmosphérique, voici comment on procède : On prend un tube d'un

mètre de longueur environ (fig. 65), gradué en parties d'égale capacité, on le remplit de mercure aux deux tiers puis on le bouche avec le doigt, on le plonge dans une cuvette étroite et profonde, pleine de mercure, et l'on enfonce le tube jusqu'à ce que le niveau du mercure soit le même dans le tube et autour du tube, ce qui indique que la force élastique intérieure est égale à la pression atmosphérique. On lit alors le nombre de divisions occupées par le gaz dans le tube. Cela fait, on soulève le tube d'une certaine quantité; la grandeur de l'espace occupé par le gaz devenant plus considérable, sa force élastique diminue. Dès lors la pression qu'il exerce par l'effet de son élasticité n'étant plus égale à la pression atmosphérique, l'équilibre est rompu, et la pression atmosphérique l'emportant fait monter le mercure à une certaine hauteur, telle que la pression exercée par le gaz en vertu de sa force élastique, en s'ajoutant au poids de la colonne de mercure soulevée, constitue une somme égale à la pression atmosphérique. La force élastique du gaz, égale d'ailleurs à la pression qu'il supporte, sera donc mesurée par la différence entre la hauteur barométrique et la hauteur *ab*. Supposons que le tube ait été soulevé de telle sorte que le gaz occupe un volume double de son volume primitif, son élasticité doit, si la loi de Mariote est vraie, être réduite à moitié de sa valeur primitive, à la moitié de la pression atmosphérique; alors la hauteur de la colonne devra représenter l'autre moitié de cette pression. Si l'on mesure cette hauteur à l'aide d'une règle

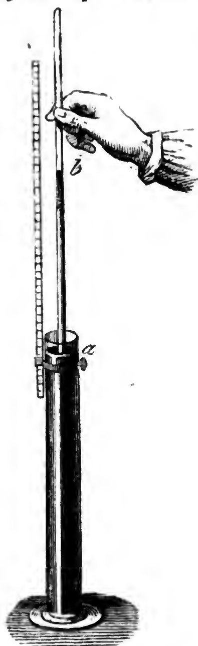


Fig. 65.

dressée le long du tube, on vérifie en effet qu'elle est la moitié de la hauteur du mercure dans le baromètre.

Pour l'air, la loi de Mariote a été reconnue vraie, à de très-faibles différences près, pour de très-hautes pressions comme pour les pressions les plus faibles. Il n'en est pas de même de tous les gaz. Il en est un très-grand nombre que l'on ramène, en les comprimant convenablement, à l'état liquide. Pour ces gaz, et c'est le plus grand nombre, la loi de Mariote cesse d'être vraie dès qu'on les soumet à des pressions voisines de celle qui déterminerait leur liquéfaction. Leur volume diminue plus rapidement que ne l'indiquerait la loi.

Comme conséquence de cette loi importante, nous trouvons maintenant ce second principe : la densité d'un gaz étant en raison inverse du volume qu'il occupe, est proportionnelle à son élasticité ou à la pression qu'il supporte, puisque cette élasticité est elle-même en raison inverse du volume.

Si donc dans un espace où l'air se trouverait renfermé sous une pression de 10 atmosphères, nous prenions un litre de cet air, il pèserait 10 fois 1gr,3, ou 13 grammes.

Manomètre. — Quand on a à mesurer la tension d'un fluide élastique renfermé dans un espace clos, on fait usage d'instruments appelés *manomètres*. Lorsque la force élastique ne dépasse pas de beaucoup la pression atmosphérique, ou même lorsqu'elle lui est inférieure, on emploie le manomètre à air libre. Ce manomètre (fig. 66) n'est autre chose qu'un tube à deux branches parallèles MNP. L'extrémité M s'abouche avec le récipient qui contient le gaz; l'autre extrémité P est en communication libre avec l'air. Du mercure remplit l'espace inférieur *aNb*. Si l'air logé dans le récipient a une élasticité égale

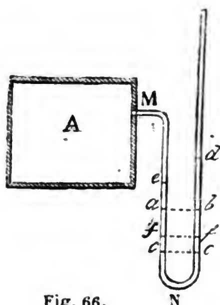


Fig. 66.

à la pression atmosphérique, les deux niveaux seront sur un même plan horizontal *ab*. Si l'élasticité de l'air intérieur est supérieure à la pression atmosphérique, alors la colonne de mercure est refoulée ; le niveau *a* passe en *c*, et le niveau *b* en *d*, de telle sorte que la pression produite par le gaz en *c* soit égale à la pression qui s'exerce en *c′*, et qui est égale à la pression atmosphérique, augmentée de la hauteur de mercure *dc′*. Ainsi, si le baromètre donne pour pression atmosphérique 0^{m},761, et que la hauteur *dc′* soit 0^{m},029, la force élastique du gaz sera 0^{m},761 + 0^{m},029 = 0^{m},790.

Si, au contraire, la force élastique dans le récipient est moindre que la pression atmosphérique, la colonne mercurielle sera repoussée en sens inverse, le niveau *a* montera en *e*, le niveau *b* descendra en *f*, de telle sorte que la force élastique du gaz augmentée de la pression produite par la colonne *ef′* fasse en somme l'équivalent de la pression atmosphérique. Cette force élastique sera donc égale à la pression atmosphérique moins la hauteur *ef′*. Ainsi le baromètre marquant 0^{m},761, et la hauteur *ef* étant de 0^{m},021, la force élastique sera 0^{m},740.

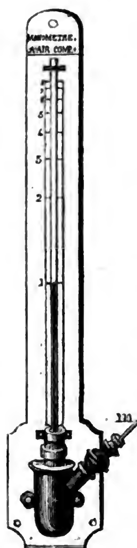


Fig. 67.

Dire que la force élastique d'un gaz est de 0^{m},740, c'est dire que la pression que ce gaz exerce en vertu de son élasticité sur une étendue de surface donnée, est égale à celle que produirait par son poids sur la même surface une colonne de mercure qui aurait cette surface pour base, et dont la hauteur serait 0^{m},740.

S'il s'agissait de mesurer des pressions notablement plus fortes que la pression atmosphérique, il faudrait donner à la branche NP une assez grande longueur. On préfère employer dans ce cas le manomètre à air comprimé. Il se compose d'un tube fermé à une de ses extrémités, et ouvert à l'autre. L'extrémité ouverte (fig. 67)

plonge dans une boîte en fer ou en verre, à fortes parois et à demi pleine de mercure. Le goulot du vase est ajusté au tube par une virole annulaire qui ferme tout accès à l'air extérieur ; enfin une ouverture latérale *m* se raccorde par un tube au récipient où se trouve le gaz comprimé. La pression de ce gaz fait monter le mercure dans le tube à une hauteur telle que l'élasticité de l'air refoulé dans la partie supérieure du tube, ajoutée au poids de la colonne de mercure soulevée au-dessus du niveau du réservoir, fasse équilibre à la pression du gaz.

Pour graduer l'instrument, on emploie une méthode empirique. On fait communiquer un réservoir contenant de l'air comprimé, à la fois avec la tubulure *m* du manomètre à air que l'on veut graduer, et avec un manomètre à air libre qui sert d'étalon, et on augmente progressivement la pression en notant sur l'échelle du premier manomètre au point où s'arrête le mercure, les valeurs de la pression fournies par le second. Une fois qu'on a gradué un manomètre à air comprimé, on peut s'en servir pour en graduer d'autres en le substituant au manomètre à air libre.

Ces appareils sont habituellement divisés en atmosphères. Ainsi, lorsque le mercure du manomètre, mis en communication avec un récipient, s'arrête au trait 5, on en conclut que la force élastique de l'air dans ce récipient est de 5 atmosphères.

On donne souvent au manomètre à air libre la disposition que nous avons décrite pour le manomètre à air comprimé. Le tube est alors ouvert à l'air, et la graduation de la tablette est en parties d'égales grandeurs, ordinairement en dixièmes d'atmosphères.

Préparation et transvasement des gaz. — Comme complément à ce chapitre nous allons donner quelques détails sur les moyens employés pour recueillir les gaz, et les transvaser d'un récipient dans un autre.

Les matières qui, en agissant chimiquement les unes sur les autres, produisent le gaz que l'on veut recueillir, sont ordinairement introduites dans un vase en verre

appelé ballon, ou dans une cornue (fig. 68); au col du ballon ou de la cornue on adapte un bouchon de bon liége percé dans le sens de son axe d'un trou cylindrique dans lequel s'engage à frottement dur un tube de verre recourbé, comme l'indique la figure. L'extrémité libre du tube plonge dans l'eau d'une cuve, sous une planchette de bois submergée, d'à peu près 2 centimètres d'épaisseur, et percée d'un trou dont le bord inférieur est évasé en forme d'entonnoir; ou bien encore sous une petite soucoupe percée d'un trou au centre de son fond (fig. 69), et offrant une échancrure à son bord, par laquelle s'engage le tube. La soucoupe est posée renversée sur le fond d'un vase plein d'eau.

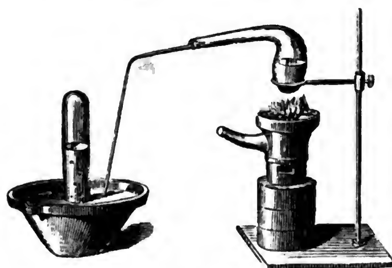


Fig. 68.





Fig. 69.

Sur cette soucoupe ou sur la planchette, on établit, au-dessus du trou, une cloche entièrement rempli d'eau que la pression atmosphérique maintient dans la cloche au-dessus du niveau de la cuve. Le gaz, se dégageant dans l'intérieur du ballon, prend, par le fait de son accumulation, une élasticité plus grande que la pression atmosphérique, alors il refoule l'eau dans le tube au-dessous du niveau de la cuve. Bientôt il arrive à l'extrémité ouverte de ce tube et se dégage alors en bulles, qui, plus légères que l'eau, montent à la partie supérieure de la cloche, et, par leur force élastique, font redescendre progressivement le liquide dans la cuve. Il sera toujours facile d'estimer, à un moment donné, l'élasticité de ce gaz ; ainsi, quand le niveau de l'eau est descendu à une certaine hauteur h au-dessus du niveau dans la cuve, l'élasticité du gaz, en s'ajoutant au poids de la colonne

d'eau, fait équilibre à la pression atmosphérique. Donc elle est égale à la pression atmosphérique mesurée par une colonne d'eau dont la hauteur serait facile à calculer, diminuée de la hauteur *h*.

Supposons que la pression barométrique soit de 0,754, la hauteur de la colonne d'eau mesurant cette même pression serait de $0{,}754 \times 13{,}6 = 10^{m},25$. Soit $h = 0^{m},17$, la force élastique du gaz serait alors 10,25 — 0,17 ou 10,08 ; en hauteur de mercure $10{,}08 : 13{,}6 = 0{,}741$.

Pour se dispenser de ce calcul, tout simple qu'il est, lorsqu'on veut connaître le volume, et par suite, le poids du gaz recueilli, on commence par ramener son élasticité à être égale à la pression atmosphérique, ce qui se fera en enfonçant la cloche dans l'eau, jusqu'à ce que le niveau soit le même dans la cloche et dans la cuve. L'élasticité se trouvera alors donnée par le baromètre.

Lorsque le gaz est soluble dans l'eau ou altérable par ce liquide, on le recueille sur le mercure en procédant de la même manière.

Pour faire passer un gaz d'une cloche dans une autre, voici le moyen que l'on emploie : la seconde cloche étant pleine d'eau et posée sur la planchette ou simplement soutenue avec la main (fig. 70), on enfonce la première sous l'eau, en abouchant son orifice avec l'orifice de l'autre, et ou incline petit à petit; le gaz monte alors en bulles au travers du liquide et va remplir la cloche. Lorsqu'on veut remplir d'air une vessie, on commence par nouer sur un robinet son ouverture naturelle ; puis, en la pressant entre les mains et tenant son robinet ouvert, on expulse l'air qu'elle contient autant que possible. On ferme alors le robinet et on le visse

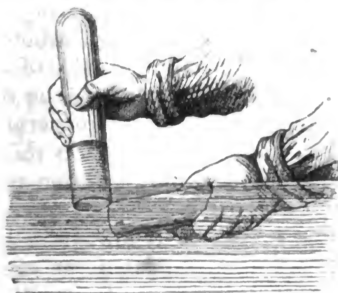


Fig. 70.

sur une cloche portant à sa partie supérieure une garniture métallique munie elle-même d'un robinet (fig. 71). Cette cloche posée sur la cuve à eau a été à l'avance, par les moyens que nous avons indiqués plus haut, remplie du gaz que l'on veut introduire dans la vessie. On ouvre alors les deux robinets, et, en pressant la cloche, on la fait enfoncer dans l'eau, ce qui force le gaz à entrer dans la vessie.

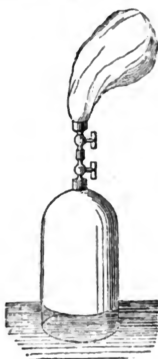


Fig. 71.

Les chimistes font fréquemment usage, quand ils ont besoin de masses de gaz un peu considérables, du récipient ou *gazomètre* dont nous allons donner la description (fig. 72).

Il se compose d'un récipient A d'une vingtaine de litres de capacité, surmonté d'un bassin B qui se rattache au réservoir par deux tubes, l'un qui débouche en *b*, l'autre *cd* qui descend jusqu'au fond du récipient. Ces tuyaux sont fermés par des robinets *n*, *p*. Un tube latéral fixé au récipient A, porte aussi un robinet *m*. Enfin une ouverture *e* est pratiquée dans le voisinage du fond et se ferme avec un bouchon à vis.

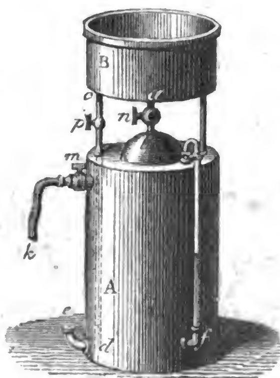


Fig. 72.

Si l'on veut introduire un gaz dans l'appareil, on commence par le remplir d'eau ; pour cela on ferme l'orifice *e* et le tube *m*, et on laisse ouverts les robinets *n* et *p* ; puis on verse de l'eau dans le bassin B. Cette eau entre dans le réservoir A par le tube *cd* et en expulse l'air par le tube *ab*. Lorsque les bulles cessent de s'échapper

par l'orifice *a*, le réservoir est plein d'eau. On ferme alors *n* et *p* et on ouvre *e*. La pression atmosphérique qui s'exerce en *e* étant capable de soutenir une colonne d'eau de 10ᵐ, pourra, à plus forte raison, soutenir l'eau qui remplit le récipient. On introduit par *e* l'extrémité du tube qui apporte le gaz fourni par un appareil producteur analogue à ceux que nous avons décrits plus haut. Au fur et à mesure que le gaz entre, bulle par bulle, dans le récipient, l'eau s'écoule par l'orifice *e*. On suit la marche descendante du niveau de l'eau sur le tube latéral en verre *fg*, et quand on a introduit le volume de gaz voulu, on retire de l'orifice *e* le tube qui apporte ce gaz. On pourrait encore, si ce gaz est déjà contenu dans un autre récipient, faire communiquer, par un tube de plomb, ce récipient avec le tube *k*, et alors ouvrir *m* et *e*. Le gaz, en pressant sur l'eau, la fera sortir par l'orifice *e* et prendra sa place dans le réservoir A. Dans ce cas, l'appareil fonctionne comme *aspirateur*.

Si l'on veut, au contraire, expulser le gaz contenu dans le réservoir A et le faire passer dans un autre appareil, on fait communiquer, par un tube en plomb, l'orifice *k* avec cet appareil; on remplit d'eau le bassin B, et, fermant *n* et *e*, on ouvre *p* et *m*. L'eau entre, comme nous l'avons déjà dit plus haut, par le tube *c d*, et force le gaz à s'échapper par *m* et à gagner l'appareil où on veut l'introduire.

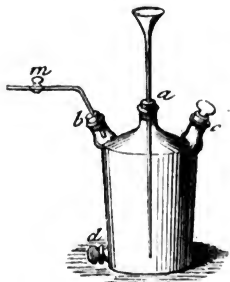


Fig. 73.

Lorsque le gaz que l'on a à faire circuler de cette manière est simplement de l'air, on peut se dispenser d'employer ce gazomètre, dont le prix est assez élevé, et faire simplement usage d'un grand flacon à tubulure, dit *flacon de Woulf* (fig. 73). Au goulot ordinaire *a* de ce flacon, on adapte un tube à entonnoir qui plonge jusqu'au fond. A la tubulure latérale *b*, on dispose un tube communiquant avec l'appareil où l'on veut porter l'air, et

l'on verse alors, par le tube à entonnoir, de l'eau qui expulse l'air du flacon. Une fois que le flacon est plein d'eau, on ferme le robinet *m*, puis on ouvre *c* pour laisser la pression atmosphérique s'exercer à la surface de l'eau ; si l'on vient alors à ouvrir *d*, l'eau s'écoule par cet orifice, et l'apparcil se remplit d'air de nouveau. Alors on renferme *c*, *d* on rouvre *m;* et en renversant de l'eau dans l'entonnoir, on recommence la circulation.

Les grands gazomètres dont on fait usage dans les usines où l'on fabrique le gaz d'éclairage sont d'immenses cloches en tôle, de quinze mètres environ de largeur et de hauteur, renversées sur une cuve en maçonnerie pleine d'eau. Ces cloches sont maintenues en équilibre entre des colonnes en fonte à l'aide d'un système de contrepoids suspendus à des chaînes qui passent sur des poulies et vont se fixer à la partie supérieure de la cloche. Le gaz arrive par un gros tuyau engagé dans le sol et montant jusqu'au niveau de l'eau. Il soulève alors la cloche qni monte peu à peu, maintenue par des rouleaux ou galets entre les colonnes de fonte. Lorsqu'elle est pleine, on ferme, par un robinet, le tube d'admission, et l'on ouvre en même temps un second tube établi parallèlement au premier et qui doit porter le gaz aux tuyaux de conduite. On produit la pression nécessaire pour chasser le gaz en supprimant uue partie des contrepoids.

CHAPITRE VIII.

MACHINE PNEUMATIQUE.

Dans le courant de ces leçons, nous avons eu besoin de faire le vide partiel ou total dans des récipients, et nous avons parlé de la machine pneumatique comme de l'appareil destiné à retirer l'air, soit dans l'expérience de la chute des corps dans le vide, soit dans l'expérience de Galilée pour démontrer que l'air est pesant, et dans d'autre cas encore ; le temps est venu, maintenant que nous savons suivant quelles lois varient l'élasticité et la densité des gaz, de donner la théorie et la description de cette machine, dont l'usage est continuel en physique et en chimie, et nous lui consacrons ce chapitre.

Théorie de la machine pneumatique.—L'invention de cette machine date de 1650 ; elle est due à Otto de Guéricke, bourgmestre de Magdebourg. Dans son origine, elle était infiniment plus simple qu'elle ne l'est maintenant. Les perfectionnements sont arrivés petit à petit, au fur et à mesure que l'on reconnaissait les inconvénients des anciens appareils. Pour en bien faire comprendre la théorie, nous prendrons la machine telle que l'avait construite l'inventeur.

L'appareil d'Otto de Guéricke se composait d'un cylindre ou corps de pompe A, parfaitement *alésé*, c'est-à-dire ayant rigoureusement le même diamètre dans toute sa longueur (fig. 74). Au fond de ce cylindre était abouché un tuyau deux fois recourbé à angle droit CDEF. Un robinet *n* pouvait fermer ce tuyau. L'extrémité F se terminait par un pas de vis sur lequel pouvait s'adapter un récipient à robinet B.

Dans le corps de pompe A glisse à frottement un piston M, mis en mouvement par une tige à traverse ; ce pis-

ton est percé d'une *cavité* fermée par un clapet, ou soupape, tournant sur une charnière et pouvant s'ouvrir de bas en haut, de manière à établir une communication entre le dessous et le dessus du piston.

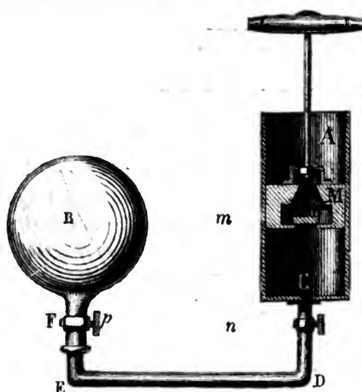


Fig. 74.

Prenons d'abord le piston au plus bas de sa course, c'est-à-dire en contact par sa face inférieure avec le fond du corps de pompe, la soupape *m* fermée par son propre poids, et les robinets *n* et *p* ouverts; et remontons le piston au plus haut de sa course. Les robinets *n* et *p* laissant le tuyau ouvert, l'air du récipient B qui tend toujours à occuper un plus grand volume se répandra, au fur et à mesure que le piston s'élève, dans l'espace tout entier qui lui est offert; et quand le piston sera arrivé au plus haut du cylindre, cet air occupera le ballon B, le tuyau de communication, et le corps de pompe au-dessous du piston. Puisqu'il y a eu dilatation, il y a eu en même temps diminution d'élasticité et de densité dans un rapport facile à évaluer en appliquant la loi de Mariote. La soupape *m* est restée immobile, car elle supporte sur sa face supérieure la pression atmosphérique, et sur sa face inférieure une pression moindre, puisque le gaz logé sous cette soupape a diminué d'élasticité par le fait de l'augmentation du volume. L'excès de pression étant sur la face supérieure, la soupape se trouve appliquée contre l'ouverture du piston, et la maintient fermée.

Fermons actuellement le robinet *n* et abaissons le piston. Le gaz logé sous le piston va se trouver renfermé dans un espace de plus en plus petit, aussi petit même que l'on

voudra, si la face du piston peut s'appliquer exactement sur le fond du corps de pompe sans laisser au-dessous d'elle le moindre vide; c'est-à-dire, d'après la loi de Mariote, que l'élasticité de ce gaz pourra devenir aussi grande que l'on voudra. Il y aura donc, à coup sûr, une position du piston telle, que l'élasticité du gaz logé au-dessous de lui sera égale à la pression atmosphérique, et que la soupape m sera pressée également sur ses deux faces. En abaissant davantage le piston, la pression de bas en haut l'emportera, vaincra la résistance due au poids de cette soupape, la soulèvera et livrera alors passage à l'air qui continuera à s'échapper par cette ouverture jusqu'à ce que le piston soit arrivé en contact avec le fond du cylindre.

Si nous fermons le robinet n, nous nous retrouvons dans les mêmes conditions qu'à l'origine; seulement une portion de l'air du ballon B a été enlevée, et l'élasticité, ainsi que la densité, y ont diminué.

Si le corps de pompe a une capacité d'un litre, et si le récipient B, en y comprenant le tuyau de communication, a en volume 4 litres, il est évident que le volume total du gaz, lorsque le piston est au plus haut de sa course, est de 5 litres. Le volume étant les $\frac{5}{4}$ de ce qu'il était primitivement, l'élasticité et la densité sont réduites au $\frac{4}{5}$ de leur valeur première; et le ballon séparé, par la fermeture du robinet n, du reste de la masse d'air, ne contient plus que les $\frac{4}{5}$ de la masse totale du gaz qui y était d'abord.

Une fois que le piston sera revenu au bas du cylindre, on ouvrira de nouveau le robinet n, et on ramènera le piston au haut de sa course. Alors l'air du ballon B se partagera entre la capacité de ce ballon et la capacité du corps de pompe, en prenant une élasticité et une densité encore plus petites (toujours dans le même rapport de 4 à 5); par conséquent la soupape m se maintiendra fermée. Puis, quand on abaissera le piston après avoir fermé n, on augmentera l'élasticité autant qu'on voudra, puisque le volume peut être rendu aussi petit que l'on

veut. Il y aura donc nécessairement une position du piston pour laquelle la soupape *m* sera soulevée; seulement, comme il y a eu affaiblissement dans l'élasticité du gaz au départ, il faudra, pour soulever la soupape, descendre le piston un peu plus dans ce second mouvement que dans le premier. Le piston étant revenu au bas de sa course, on ouvrira de nouveau *n*; puis on relèvera le piston et ainsi de suite indéfiniment, laissant, après chaque coup de piston, dans l'appareil B, les $\frac{4}{5}$ de l'air qui y était auparavant.

On voit, d'après cela, que, même en supposant la machine construite avec la plus rare perfection, la face inférieure du piston ne laissant au-dessous d'elle aucun vide quand le piston est au bas de sa course, de telle sorte que l'air du cylindre soit complétement expulsé, on n'arriverait jamais au vide absolu, puisque après chaque coup de piston on laisserait encore les $\frac{4}{5}$ de l'air qui y était auparavant; seulement, quelque raréfié que fût l'air, on pourrait encore le raréfier davantage en donnant un coup de piston de plus.

Mais cette perfection est impossible à atteindre, même dans les machines modernes que nous décrirons tout à l'heure. Le piston ne s'applique pas complétement sur le fond du corps de pompe; de plus ce piston, pour pouvoir glisser dans le corps de pompe, n'a qu'un contact imparfait avec les parois, ce qui laisse rentrer un peu d'air; enfin les diverses parties de l'appareil ajustées à vis ou par un masticage, laissent aussi rentrer un peu d'air; de sorte que les meilleures machines ne font guère le vide au delà d'un millimètre, c'est-à-dire que la force élastique du gaz, restant dans le récipient, peut être équilibrée par le poids d'une colonne de mercure d'un millimètre de hauteur.

Il faut remarquer aussi que la manœuvre du piston devient d'autant plus difficile que l'air est plus raréfié dans le récipient, et par conséquent sous le piston quand celui-ci s'élève. En effet, pendant toute la durée de l'opération, la face supérieure du piston supporte la pression atmo-

sphérique, qui équivaut à environ 1 kilogramme par centimètre carré de surface. Dans l'origine, cette pression est équilibrée par la pression que l'air logé sous le piston exerce sur la face inférieure en vertu de son élasticité ; mais au fur et à mesure que cette élasticité diminue, elle n'équilibre plus qu'une portion de plus en plus faible de la pression supérieure ; et si l'on pouvait arriver à faire le vide complet, on aurait à vaincre, pour soulever le piston, cette pression tout entière.

Ponr fixer les idées, supposons que la surface du piston soit de 1 décimètre carré, ou 100 centimètres carrés, la pression sur la face supérieure sera de 100 kilogrammes. Si l'air logé sous le piston n'a plus qu'une élasticité égale au 20ᵉ de la pression atmosphérique, la pression exercée de bas en haut par cet air sur la face inférieure du piston équivaudra à 5 kilogrammes seulement. Il restera donc un excédant de pression de haut en bas égal à 95 kilogrammes.

Cet inconvénient n'existe plus dans les machines modernes, qui ont deux corps de pompe parallèles, dont les pistons sont munis de tiges à crémaillères, engrenant sur une route dentée qui les fait mouvoir alternativement, c'est-à-dire que l'une descend pendant que l'autre monte. Les deux pistons, ayant même surface, supportent des pressions égales. Ils se trouvent alors dans les mêmes conditions que les deux plateaux égaux d'une balance. Leurs charges s'équilibrent et produisent pour tout effet une pression sur les supports de l'axe de la roue.

En outre, les pistons manœuvrant alternativement, le vide se fera deux fois plus vite,

Après avoir ainsi exposé la théorie du jeu de la machine, nous allons décrire les différentes pièces dont elle se compose, en la présentant sous divers aspects pour mieux juger des positions relatives. Les figures 75 et 76 représentent la vue de face et le plan de l'appareil ; la figure 77, la coupe du corps de pompe et du piston, ainsi que la disposition des soupapes.

Les deux cylindres sont ordinairement en cristal, dressés verticalement entre un plancher solidement fixé sur une forte table en chêne et une sorte de caisse plate formant fronton, et qui renferme la roue dentée engrenant avec les crémaillères des pistons dont nous avons parlé plus haut Des colonnes fixées par de solides écrous rattachent l'une à l'autre ces deux pièces.

Le piston se compose de disques en cuir fortement serrés entre deux disques de métal formant l'un la face supérieure, l'autre la face inférieure. Les disques en cuir,

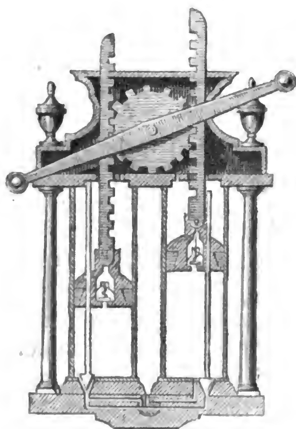


Fig. 75.

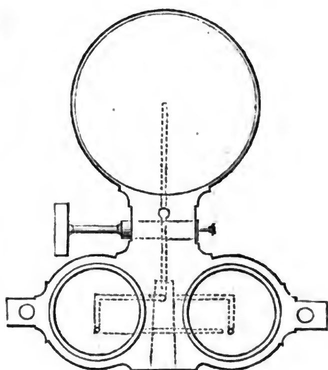


Fig. 76.

de forme annulaire, embrassent les parois métalliques d'une cavité creusée dans l'intérieur du piston et qui loge la soupape. Cette soupape est formée d'un petit bouchon conique en laiton, surmonté d'une tige; le bouchon est destiné à fermer une ouverture également conique percée dans la face métallique inférieure du piston. La tige passe dans une petite traverse horizontale évidée en anneau; un petit ressort roulé en tire bouchon appuie d'un côté contre la traverse, de l'autre contre le cône, et aide à la fermeture de l'orifice.

Le robinet qui, dans l'ancienne machine d'Otto de

Guéricke, fermait ou ouvrait la communication entre le récipient et le corps de pompe, est remplacé par une soupape conique comme celle du piston ; une tige métallique traverse à frottement dur la partie du piston garnie d'anneaux de cuir et porte à sa partie inférieure ce bouchon métallique. Elle traverse aussi la plaque de laiton qui ferme imparfaitement en haut le cylindre, et présente un petit renflement ou *butoir* qui, venant heurter contre les bords de l'ouverture par laquelle elle passe, limite à un demi-millimètre environ le mouvement d'élévation de la

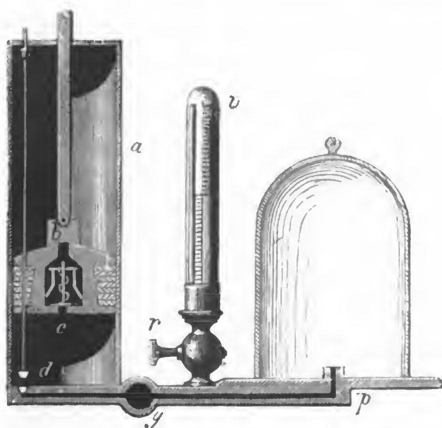


Fig. 77.

soupape. De cette manière, dès que le piston monte, il soulève la soupape qui découvre l'orifice ; mais comme la tige est arrêtée par le butoir, le piston glisse le long de cette tige de bas en haut, la soupape restant ainsi suspendue à un demi-millimètre au-dessus de l'ouverture. Le piston vient-il, au contraire, à descendre, il entraîne avec lui la soupape, et fait fermer l'ouverture ; il continue alors son mouvement de descente en glissant de haut en bas le long de la tige.

La figure qui donne le plan de l'appareil montre un conduit en forme de T creusé dans l'épaisseur du plan-

cher métallique qui sert de support aux cylindres. C'est ce conduit qui fait communiquer la capacité des corps de pompe avec la cloche ou le ballon dans lequel on veut faire le vide.

Lorsqu'on a raréfié l'air à un degré déterminé, il faut pouvoir isoler le récipient des corps de pompe, et faire rentrer l'air à volonté sous ce récipient ou sous le corps de pompe. Ce résultat s'obtient à l'aide du robinet (fig. 78).

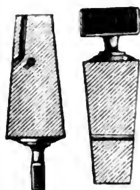


Fig. 78.

Il est percé de deux conduits : l'un qui le traverse de part en part perpendiculairement à son axe, de telle manière que lorsque la clef du robinet est placée horizontalement, la communication est établie entre les corps de pompe et le récipient par le conduit continu. Si, au contraire on place cette clef verticalement, les parois pleines du robinet ferment évidemment ce même conduit. Le second canal percé dans le robinet est, au contraire, dirigé parallèlement à l'axe et vient déboucher sur le côté, dans le même plan perpendiculaire à l'axe où se trouve déjà le premier conduit, mais à 90° de ses orifices. Il résulte de là que lorsque la clef est tournée verticalement, de manière à fermer la communication des corps de pompe avec le récipient, l'orifice du conduit coudé vient s'ouvrir soit dans la partie du canal principal qui mène au récipient, soit dans la partie qui mène au corps de pompe, suivant qu'on a tourné à droite ou à gauche. Un petit bouchon métallique ferme du dehors ce conduit; on le retire pour laisser rentrer l'air.



Fig. 79

Éprouvette manométrique (fig. 79). — La force élastique du gaz laissé dans le récipient se mesure à l'aide d'un petit baromètre à siphon établi dans une éprouvette en verre à parois épaisses, qui communique avec le conduit des corps de pompe au récipient. La branche pleine de mercure de ce baromètre a environ $0^m,20$ de hauteur.

On comprend que tant que l'air du récipient et de l'éprouvette aura une élasticité plus grande que $0^{m},20$, le mercure restera tout entier logé dans cette branche. Mais dès que la pression descendra au-dessous de cette limite, le mercure commencera à descendre en s'élevant de l'autre côté. La force élastique sera mesurée par la différence de hauteur des niveaux. Cette différence se lit sur une petite échelle en millimètres tracée sur la tablette qui porte le baromètre. Si l'on pouvait faire le vide complétement, les deux niveaux s'établiraient sur un même plan horizontal. Nous avons déjà dit que ce vide complet était impossible à atteindre. Avec une bonne machine on peut faire le vide à deux millimètres, c'est-à-dire que la différence de niveau dans les deux branches n'est plus que de deux millimètres. La force élastique de l'air ainsi raréfié produit donc encore sur une surface d'un centimètre carré une pression égale à celle que produirait par son poids une colonne de mercure de deux millimètres de hauteur ayant cette surface pour base; cette pression équivaut à $2^{gr},7$ environ.

On construit cependant des machines pneumatiques perfectionnées par M. Babinet, et avec lesquelles on peut pousser la raréfaction à un millimètre.

Le conduit d'aspiration vient se terminer en se recourbant au centre d'un plateau circulaire appelé la *platine*. Son orifice est entouré d'un pas de vis dont nous ferons tout à l'heure connaître l'usage.

Il nous faut maintenant indiquer la manière d'opérer. Si l'on a à faire le vide sous une cloche, on la pose simplement sur la platine, au centre de laquelle vient déboucher le conduit qui va aux corps de pompe. Il faut prendre une cloche à bords usés sur une surface plane, et enduire ces bords de suif pour déterminer le contact intime avec la platine, et empêcher l'air de rentrer au fur et à mesure qu'on l'enlève. Si l'on veut enlever l'air d'un ballon à robinet, on visse ce robinet sur le pas de vis de la platine.

La machine pneumatique va nous fournir de nouvelles

expériences à ajouter à celles que nous avons déjà citées, pour démontrer la pression exercée par l'air en vertu de son poids.

1° Lorsque la cloche est simplement posée sur la platine, le moindre effort suffit pour l'en détacher ; on n'a à vaincre que la faible adhérence établie par le suif entre les bords de la cloche et la surface plane sur laquelle ils posent. Mais si on retire l'air de la cloche, alors la résistance devient énorme; et l'on soulèverait avec la cloche la machine elle-même sans les séparer.

2° Si l'on prend deux calottes hémisphériques en laiton s'appliquant exactement l'une sur l'autre par leurs bords bien planés et enduits de suif, on les détache facilement l'une de l'autre. Mais si l'on visse sur la machine pneumatique le robinet dont l'une d'elles est garnie (fig. 80), et si l'on fait le vide dans l'espace qu'elles comprennent, alors elles adhèrent avec une force très-grande. Cette expérience, qui montre que la pression atmosphérique s'exerce dans tous les sens, a été faite pour la première fois par Otto de Guéricke. Elle est connue sous le nom d'expérience des *hémisphères de Magdebourg*.



Fig. 80.

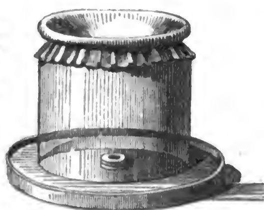
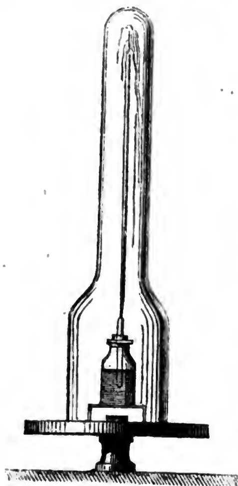


Fig. 81.

3° Si l'on tend sur le goulot d'un vase sans fond une membrane de vessie (fig. 81), et si l'on pose ce vase sur la platine de la machine, tant qu'on laisse à l'air logé sous la vessie une élasticité égale à la pression extérieure, la surface de la membrane reste plane; mais si l'on fait mouvoir les pistons, on voit immédiatement cette membrane se creuser en dedans et bientôt s'enfoncer sous l'énorme pression qu'elle supporte, en produisant une détonation pareille à un coup de fusil Cette détonation

est due à la rentrée brusque de l'air à l'intérieur du vase et à l'ébranlement qui en résulte pour l'air extérieur.

4° Si l'on remplit d'eau à moitié un petit flacon en verre (fig. 82), puis qu'on le ferme avec un bouchon percé d'un trou dans lequel passe un petit tube de verre plongeant dans l'eau ; quand on placera ce vase sur la platine, et qu'après l'avoir recouvert d'une cloche un peu haute, on fera le vide sous cette cloche, on verra l'eau s'élever en jet dans l'intérieur de la cloche sous l'influence de l'excès de pression de l'air resté dans le flacon avec son élasticité première.


Fig. 82.

Cette expérience a, comme on le voit, une relation intime avec l'expérience de *Torricelli* et la théorie du baromètre et des pompes.

Pompes. — Sans entrer dans aucun détail sur la construction des pompes, nous allons indiquer comment leur théorie se rattache à celle de la machine pneumatique.

Supposons un corps de pompe semblable à celui de la machine avec son piston à soupape A (fig. 83); son tuyau, fermé aussi par une soupape B, au lieu d'aller à la platine, plonge verticalement dans l'eau. Le jeu du piston a pour effet de raréfier l'air dans ce tuyau qui est alors lui-même le récipient. Cette raréfaction de l'air donnant la prépondérance à la pression atmosphérique, qui s'exerce extérieurement à la surface de l'eau, fait monter cette eau dans le tuyau. Bientôt elle arrivera jusqu'à la soupape B, la franchira et pénétrera dans le corps de pompe. D'après la position de la soupape B, on voit que, lorsque le piston monte, cette soupape est soulevée, soit par la pression de l'air logé au-dessous, soit par la pression de

l'eau, poussée de bas en haut par le poids de l'atmosphère; mais que, quand le piston descend, cette soupape se trouvant fermée, l'eau ne peut plus redescendre; une fois entrée dans le corps de pompe elle arrivera au piston, et alors ce ne sera plus l'air, mais l'eau elle-même qui s'échappera par la soupape A.

L'eau n'arrivera jamais à la soupape A que si la distance du piston au niveau de l'eau dans le réservoir est moindre de 10^{m},30. Car, en admettant qu'il y eût le vide le plus complet sous le piston, la pression atmosphérique ne pourrait soutenir qu'une colonne d'eau de cette hau-

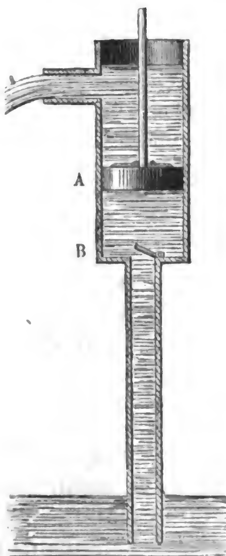


Fig. 83.

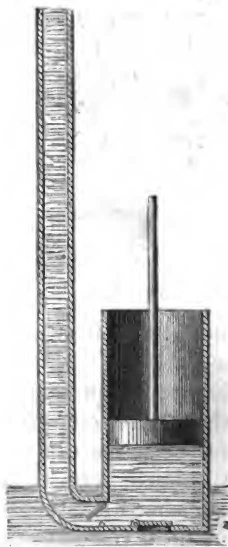


Fig. 84.

teur; encore cette condition ne serait-elle suffisante que si le piston arrivait en contact parfait avec le fond du corps de pompe. Comme il n'en est jamais ainsi, il faut établir un certain rapport entre l'étendue de l'espace que parcourt le piston, l'espace qu'il laisse au-dessous de

lui quand il est au plus bas de sa course, et les dimensions du tuyau d'aspiration.

On comprend qu'au lieu de faire sortir l'eau par la soupape A, on pourrait la chasser par une ouverture latérale au corps de pompe qui la conduirait dans un tuyau (fig. 84); le piston est alors plein; cela ne change absolument rien à la théorie, et peu de chose aux conditions pratiques de construction.

Les premières espèces de pompes s'appellent *pompes aspirantes*, les secondes *pompes aspirantes et foulantes*, quand elles ont un tuyau d'aspiration, et pompes *foulantes* quand leur corps de pompe plonge immédiatement dans l'eau, comme on le voit dans la figure 84. La distinction n'existe réellement que dans les mots, car les premières sont aussi bien foulantes que les secondes.

Pompe de Gay-Lussac. — On emploie assez souvent, pour raréfier l'air dans de petits appareils, une espèce de

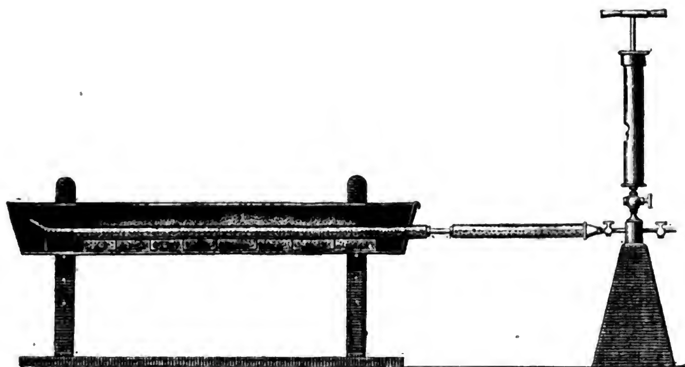


Fig. 85.

machine pneumatique très-simple, à un seul corps de pompe, qu'on appelle *pompe de Gay-Lussac.* La figure ci-jointe (fig. 85) fait voir la disposition du corps de pompe et du piston, en tout semblables, sauf les dimensions, à ceux de la machine pneumatique elle-même.

L'un des deux petits tubes latéraux se met en communication à l'aide d'un tube flexible en plomb avec l'espace où l'on veut raréfier l'air et qui est, sur notre figure, un tube à analyse organique, placé sur un fourneau; l'autre tube latéral s'ouvre librement à l'air extérieur. C'est par là que l'on rend à volonté l'air dans l'appareil où l'on a fait le vide.

Machine de compression. — La machine pneumatique, que nous avons décrite, a pour but de raréfier l'air, de faire le vide. Il existe d'autres espèces de machines pneumatiques appelées *machines de compression*, et qui servent au contraire à accumuler l'air dans un réservoir, de manière à y augmenter la densité et l'élasticité. La machine de compression est construite comme la machine à raréfier; la seule différence est dans la position des soupapes qui s'ouvrent de haut en bas, tandis que celles de la machine pneumatique ordinaire s'ouvrent de bas en haut. On conçoit alors que, quand le piston montera, l'air du dehors forcera sa soupape pour descendre dans le corps de pompe; puis, quand le piston descendra, il comprimera cet air qui maintiendra fermée la soupape du piston et ouvrira la soupape établie au fond du corps de pompe, et qui permet à l'air de pénétrer dans le récipient. Le récipient est solidement établi et vissé sur la platine.

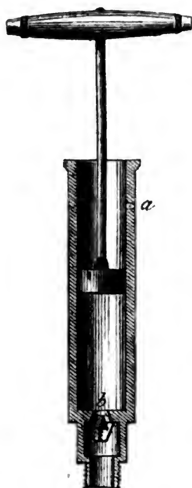


Fig. 86.

Pompe de compression. — Cet appareil peut être remplacé par un autre beaucoup plus simple, qui est à la machine de compression ce que la pompe de Gay-Lussac est à la machine ordinaire. C'est un cylindre dans lequel glisse un piston sans soupape (fig. 86). Il n'y a de soupape qu'à la partie inférieure du cylindre; elle s'ouvre de dedans en de-

hors. Au haut du corps de pompe est pratiquée latéralement une petite ouverture *a*, placée de telle manière que lorsque le piston est au haut de sa course, il la laisse au-dessous de lui, ce qui permet à l'air du dehors de venir remplir le cylindre. Ce petit appareil, appelé *pompe de compression*, se visse sur le réservoir où l'on veut condenser l'air, comme, par exemple, la crosse d'un fusil à vent. Chaque fois que le piston est amené au haut de sa course, le cylindre se remplit d'air par la petite ouverture. Puis, quand le piston descend, il ferme cette ouverture. L'air emprisonné augmente d'élasticité à mesure que son volume diminue, repousse alors la soupape *b* et pénètre dans le récipient. Quand le piston remonte ensuite, comme il fait le vide sous sa surface, la soupape est poussée de bas en haut par l'excédant de pression de l'air condensé dans le récipient; par conséquent cet air ne peut s'échapper.

On peut remplacer la petite ouverture d'admission de l'air par un tube latéral soudé à la partie inférieure du corps de pompe et contenant une soupape qui s'ouvre de dehors en dedans pour laisser entrer l'air extérieur quand le piston s'élève, et se referme au contraire quand le piston s'abaisse. En adaptant sur ce tube un tuyau en plomb, on peut le rattacher à un gazomètre contenant un gaz quelconque.

La petite pompe de Gay-Lussac a été modifiée dans sa disposition de manière à pouvoir fonctionner à volonté soit comme appareil de raréfaction, soit comme appareil de compression. Le piston est plein et le fond du corps de pompe est percé de deux trous, l'un qui communique avec un des petits tubes latéraux, et sur lequel se trouve adaptée une soupape s'ouvrant de bas en haut; l'autre qui communique de la même façon avec le second petit tube, et qui porte une soupape s'ouvrant de haut en bas (fig. 87). Le jeu de ces soupapes s'explique sans peine. Il est facile de comprendre que, suivant que l'on ajustera l'un ou l'autre des deux tubes au récipient, le second tube communiquant avec l'air extérieur, le piston soutirera l'air

du récipient pour le rejeter au dehors, ou prendra l'air au dehors pour le refouler dans le récipient. Un robinet établi entre les deux tubes sert à ouvrir ou à fermer la communication directe avec l'air extérieur.

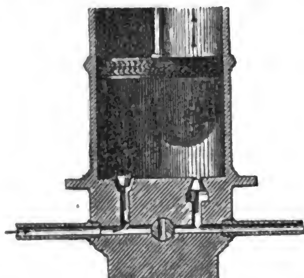


Fig. 87.

Nous avons tout à l'heure montré l'eau jaillissant dans le vide par ce seul fait que l'air logé dans le flacon qui la renferme a conservé son élasticité première, tandis que la pression extérieure qui s'exerce dans le petit tube a disparu, ou du moins a considérablement diminué. On obtiendra évidemment le même résultat, en conservant intacte la pression extérieure et augmentant au contraire la pression intérieure. On prend pour cela un vase en métal construit comme le flacon qui nous a servi pour le jet d'eau dans le vide (fig. 88). L'extrémité du tube est munie d'un robinet et d'un pas de vis sur lequel on établit la pompe de compression. L'air refoule l'eau du tube et vient se loger dans la chambre au-dessus de l'eau. Quand on a accumulé une quantité d'air assez grande, on ferme le robinet, on enlève la pompe et on visse à sa place un petit ajutage conique percé d'un trou; quand on rouvrira alors le robinet, on verra l'eau s'élever en jet d'une grande hauteur.



Fig. 88.

Chemin de fer atmosphérique. — Une des plus

belles applications industrielles que l'on ait faites de la machine pneumatique, est sans contredit l'invention des chemins de fer atmosphériques. Le premier germe de cette invention se retrouve dans une expérience faite autrefois par Otto de Guéricke. Il avait fait dresser verticalement contre un mur un cylindre dans lequel glissait un piston plein; une corde attachée au piston passait sur une poulie et était tirée par quatre hommes vigoureux (fig. 89); un tuyau muni d'un robinet était adapté

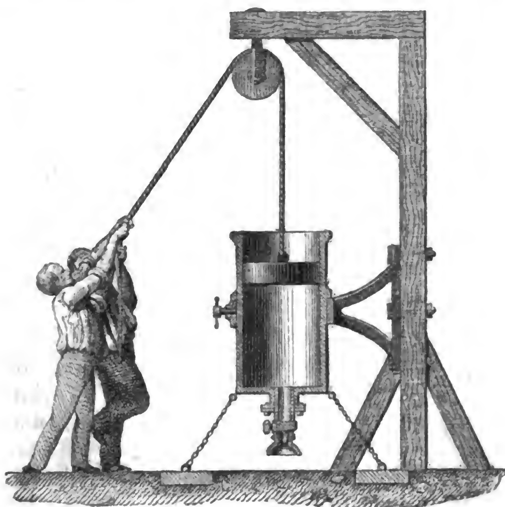
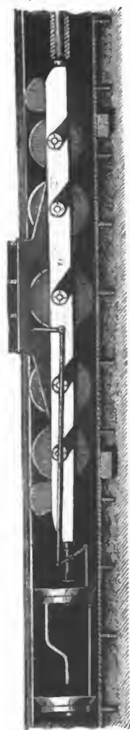


Fig. 89.

au fond du cylindre et communiquait par un tube avec la machine pneumatique. Les choses disposées de cette manière, Otto fit le vide sous le piston et alors celui-ci, poussé de haut en bas par la pression atmosphérique, descendit, entraînant avec lui les quatre hommes suspendus à la corde et tirant de toutes leurs forces.

Qu'on se figure maintenant le cylindre d'Otto de Guéricke couché horizontalement à une petite profondeur sous la voie, à égale distance des rails, et s'étendant ainsi

sur une longueur de plusieurs kilomètres. Admettons que son piston ait seulement un demi-mètre carré de superficie, c'est-à-dire 5000 centimètres carrés. Si au moyen d'une puissante machine pneumatique on fait le vide en avant du piston, alors la pression atmosphérique le poussera par derrière avec une force de 5000 kilogrammes. Il n'y a plus qu'à concevoir ce piston rattaché au convoi placé sur les rails et l'on aura alors une force motrice puissante, capable d'entraîner sur leur surface polie une charge énorme.


Fig. 90.

Il est bon de remarquer que la force n'a pas à faire équilibre à la charge, puisqu'elle repose sur un plan horizontal, mais à vaincre le frottement de roulement qui n'est jamais qu'une fraction très-faible du poids, un dixième au plus. Dans le cas actuel le piston pourrait donc entraîner dix wagons avec leur maximum de charge qui est précisément de 5000 kilogrammes environ.

La difficulté consistait à rattacher le piston au premier wagon sans établir de communication nuisible entre le cylindre et l'air du dehors, car il faut évidemment que le vide soit possible. Pour cela le piston offre deux têtes distinctes rattachées l'une à l'autre par une forte tige. Le tube est fendu dans toute sa longueur d'une fente rectiligne fermée par une bande de cuir (fig. 90). Dans la partie du cylindre qui est en avant du piston, la pression étant diminuée au dedans par l'action de la pompe, la pression extérieure applique la bande de cuir sur la fente et la ferme. En arrière du piston, au contraire, il n'y a aucun inconvénient à ce qu'il y ait communication avec le dehors; cette communication doit même exister pour que le piston supporte à sa face postérieure la pression

atmosphérique. Aussi à la tige qui rattache les deux têtes du piston on a fixé une autre tige perpendiculaire, qui passe par la fente en soulevant la soupape de cuir, et va s'attacher au wagon qui tient la tête du convoi. Des galets roulant en arrière sur la bande de cuir, la remettent en place après le passage du piston.

Siphon. — Lorsque l'on a à faire passer un liquide d'un vase dans un autre, sans déplacer le premier, on emploie un petit appareil appelé *siphon*. C'est un simple tube recourbé en forme de U et ouvert à ses deux extrémités; l'une des branches plonge dans le liquide, l'autre reste suspendue dans l'air (fig. 91); le tube a été à l'avance rempli du liquide dans toute sa longueur, par exemple, en exerçant une succion au point C. Si alors on abandonne le liquide à lui-même, il s'écoulera par l'orifice C d'une manière continue, pourvu que le niveau MN soit au-dessus du point C. Ce mouvement d'écoulement s'explique facilement. En D la petite couche liquide, comprise à l'intérieur du tube, supporte de bas en haut, à l'unité de surface, et par transmission, la pression atmosphérique, mesurée par une colonne H du liquide qui remplit le vase. — En outre, elle supporte de haut en bas la pression de la colonne DB, pression mesurée sur l'unité de surface par la hauteur verticale DE ou *h*. C'est donc en définitive une pression de bas en haut égale à la différence H — *h*; *h* est évidemment moindre que H, sans quoi le siphon n'aurait pu être *amorcé*. De même en C l'unité de surface supporte directement de bas en haut la pression atmosphérique, toujours mesurée par une colonne de hauteur H, du liquide qui remplit le vase. En même temps elle supporte une pression de haut en bas, exercée par la colonne CB, et mesurée en hauteur verticale par CF=*h'*. Ainsi en C la pression résultante est une force de bas en haut égale à H—*h'*. — Si ces deux pressions à l'unité de surface étaient égales, le filet liquide ABC serait en équilibre : et c'est ce qui

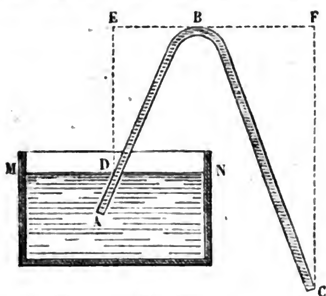


Fig. 91.

arriverait si le point C était sur le niveau horizontal MN ; pourvu toutefois que l'orifice C ne soit pas assez large pour que l'air puisse diviser le liquide et monter en B. — Mais si le point C est au-dessous du niveau MN, comme nous l'avons supposé, h' est plus grand que h, alors $H - h'$ est plus petit que $H - h$. La pression de bas en haut en D l'emportant sur la pression contraire en C, alors le filet liquide glissera dans le sens ABC. — La pression atmosphérique remplit la branche AB au fur et à mesure qu'elle se vide, et l'écoulement continue jusqu'à ce que la différence entre h et h' soit zéro, c'est-à-dire jusqu'à ce que le niveau MN soit arrivé à la hauteur du point C. Alors l'écoulement cessera, et de plus, si l'orifice C est assez large, l'air montera, comme nous l'avons dit, en se mêlant au liquide, jusqu'en B, et, pressant alors sur les deux colonnes liquides, rejettera la colonne BC au dehors, et la colonne BA dans le vase.

Les formes données au siphon varient légèrement, et les variations ont toutes pour but de faciliter l'amorçage que l'on ne peut pas toujours opérer par succion ; car il y a souvent inconvénient à laisser le liquide se mettre en contact avec les lèvres. On emploie alors des siphons dont les orifices A et C sont fermés avec des bouchons. — On les remplit par une ouverture placée en B que l'on referme après le remplissage. — Puis on découvre les orifices A et C et l'écoulement s'établit. Ou bien encore on ferme l'orifice C avec le doigt ou un bouchon, et l'on aspire au moyen d'un tube latéral établi en K, soit avec la bouche, soit avec une petite pompe à air. Cette dernière forme est représentée dans la fig. 92.

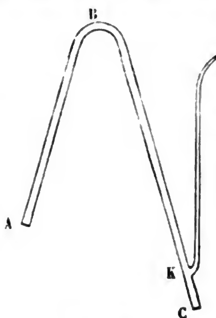


Fig. 92.

CHAPITRE IX.

ACOUSTIQUE.—PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON. INTERVALLES MUSICAUX.

Nous avons dit dans le premier chapitre de ce petit traité que lorsqu'un corps recevait dans sa forme ou dans son volume une certaine modification par l'action d'une force extérieure, si cette force venait à cesser d'agir, le corps retournait à son état primitif pourvu que l'écart subi par lui n'ait pas été trop considérable. Cette propriété et la force inhérente au corps et résultant de sa constitution moléculaire, qui détermine ce retour à la forme première, s'appellent *élasticité*. Le mouvement de retour du corps est signalé par des circonstances particulières. Voyons, par exemple, une tige rigide fixée par une de ses extrémités entre les pièces d'un étau, ou bien encore une corde tendue. Quand nous les abandonnons à elles-mêmes après les avoir écartées de la ligne droite, nous les voyons y revenir, puis dépasser cette position pour se fléchir dans le sens opposé, retourner ensuite vers la ligne droite, la dépasser encore, se portant alternativement à droite et à gauche de cette position rectiligne, s'en écartant de moins en moins à chaque fois, jusqu'à ce que cet écart finisse par devenir complétement insensible. Nous avons déjà vu dans les oscillations du fil à plomb et de la balance des mouvements analogues, quoique dus à une cause très-différente. Ici nous désignerons ce mouvement sous le nom de *vibration*.

Ces vibrations qui ont toutes la même durée, les plus petites comme les plus grandes, pendant toute la durée du mouvement vibratoire d'un corps, sont la cause productrice du son. Cependant, comme la sensibilité de nos organes est limitée, il n'y a perception du son qu'autant

que les vibrations s'exécutent avec une certaine rapidité et ont une certaine amplitude d'écart.

Pour bien nous convaincre que la cause du son est le mouvement vibratoire, passons en revue les différents moyens employés pour produire le son, et nous retrouverons partout les vibrations dues à l'élasticité.

Tonalité. — Nous avons déjà constaté le fait pour une corde et pour une tige. Il va nous être facile d'ajouter à cette première observation du mouvement vibratoire deux autres faits très-importants. Supposons la tige d'une assez grande longueur, de 3 mètres par exemple : nous pouvons suivre alors de l'œil les vibrations et compter le nombre de ces vibrations dans une minute. Raccourcissons alors un peu la longueur de la portion de tige vibrante ; nous constaterons que les vibrations deviennent d'autant plus rapides que cette longueur de tige mise en vibration est plus courte. En même temps, le son, d'abord très-grave, deviendra de plus en plus aigu. Ainsi le degré de gravité ou d'acuité d'un son, ce que l'on appelle sa *tonalité*, dépend du nombre de vibrations exécutées dans un temps donné. Un même son, au même degré de tonalité, est toujours produit par un même nombre de vibrations, quelle que soit son origine.

Intensité. — Tant que durera la vibration de la tige, le son conservera sa tonalité, puisque les oscillations sont toutes de même durée ; mais à mesure que l'amplitude d'écart diminue, le son s'affaiblit de plus en plus et finit par ne plus être perceptible. Ce nouvel élément, qu'on appelle l'*intensité*, dépend donc, non plus du nombre des vibrations exécutées dans un temps donné, mais de leur amplitude. Deux sons de même tonalité auront une intensité différente si les amplitudes de vibration sont inégales ; comme aussi deux sons de même intensité seront différents en tonalité si les durées des vibrations sont inégales.

Timbre. — Indépendamment de ces deux caractères du son, intensité et tonalité, il en est un troisième dont la nature et la cause sont loin d'être aussi bien connues.

Ainsi nous tirons d'un violon, d'une flûte, d'un hautbois, d'un harmonica, des sons identiques par la tonalité et l'intensité, et cependant si différents que l'oreille la moins exercée sait parfaitement les distinguer et reconnaître quel est l'instrument qui donne chacun d'eux. Ce caractère, qui tient particulièrement à la nature du corps vibrant, est ce que l'on appelle le *timbre*.

Division en parties vibrantes. — La corde ou la tige écartée avec le doigt de sa position d'équilibre a toutes ses parties également en mouvement, sauf les différences d'amplitude ; les extrémités fixées sont seules immobiles. Mais il est des cas où le corps vibrant peut présenter un certain nombre de points fixes séparant des parties qui vibrent en sens contraire. Ainsi, qu'une corde tendue *ab* touche au quart de sa longueur un chevalet qui fixe le



Fig. 93.

point *d* ; l'archet en frottant la portion de corde *ad* fera vibrer l'autre portion *bd* (fig. 93), exemple déjà remarquable d'un mouvement de vibration communiqué indirectement à un corps. Si l'on a de plus passé dans la portion de corde *bd* de petits anneaux de papier, on verra ces anneaux aller se fixer aux points *e* et *f* qui restent immobiles et abandonner les points intermédiaires, d'où ils sont chassés par un mouvement de vibration très-apparent à l'œil. Cette division de la corde en partie vibrante se voit encore très-bien sur une corde en soie argentée tendue au-dessus d'une table noire ; on distingue parfaitement les points immobiles et les parties vibrantes qu'ils séparent et qui présentent la forme de fuseaux de même longueur (fig. 94). Les sons que l'on obtient ainsi sont d'autant plus élevés que le nombre des parties vibrantes est plus grand et par suite que la longueur de ces parties

vibrantes est moindre; ils s'appellent les *sons harmoniques* de la corde. Chose remarquable, ces sons harmo-



Fig. 94.

niques peuvent coexister avec le son donné par la vibration de la corde tout entière, et que l'on appelle le *son fondamental*. On les entend toujours très-bien quand on fait vibrer une des cordes basses d'un piano. On saisit facilement au moins quatre harmoniques en même temps que le son fondamental.

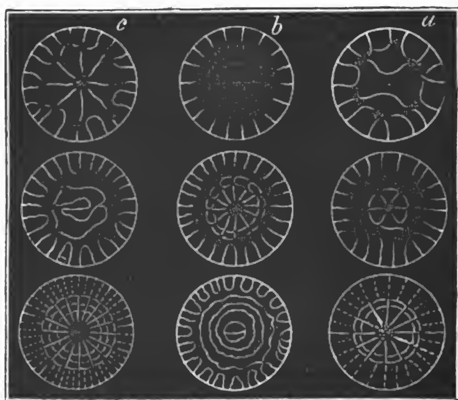


Fig. 95.

Nous allons retrouver ce mode de vibration dans les plaques métalliques. Si l'on fixe par son milieu une plaque de laiton bien dressée, et si, maintenant immobiles, avec les doigts de l'une des mains, deux ou trois des points de son contour, on frotte le bord de la plaque avec un archet, on en tire un son très-fort et très-soutenu. Si l'on a semé de sable fin et sec la surface de la plaque, on voit ce sable sauter perpendiculairement à la surface, et quitter petit à petit les points où le mouvement

de vibration est le plus prononcé, pour se porter sur des lignes disposées avec une grande régularité, et qui comprennent l'ensemble des points immobiles : c'est ce que l'on appelle les *lignes nodales*. Les figures formées par ces lignes nodales offrent, la plupart du temps, une symétrie très-remarquable; nous donnons ci-contre quelques-unes des figures nodales formées sur une plaque carrée et sur une plaque circulaire (fig. 95 et 96).

Des lames rectangulaires, mises en vibration à l'aide

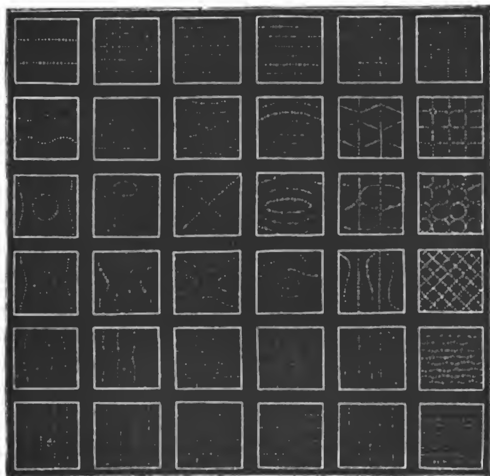


Fig. 96.

d'un archet, offrent des lignes nodales ordinairement transversales à la longueur.

Il est encore très-facile de mettre en évidence le mouvement de vibration d'une cloche ou d'un timbre, en suspendant dans l'intérieur une petite balle de cuivre qui vient toucher légèrement le bord de la cloche inclinée. Dès l'instant où la cloche est ébranlée par le choc d'un marteau ou le frottement d'un archet, et que le son se produit, on voit en même temps la petite balle de cuivre frapper

le bord de la cloche et rebondir rapidement et à des intervalles de temps égaux.

Les membranes tendues sur leurs bords vibrent à peu près comme des plaques. On les fait vibrer ordinairement en les plaçant dans le voisinage d'un corps sonore, et l'on sème leur surface de sable pour reconnaître par les figures la position des lignes nodales.

Vibrations longitudinales. — Dans les différents modes de vibration que nous venons de passer en revue, le déplacement des points s'effectue dans un sens perpendiculaire à la longueur (tiges, cordes) ou à la surface (plaques, membranes); on peut aussi déterminer facilement des vibrations dans le sens de la longueur en frottant une baguette de sapin avec les doigts recouverts de colophane finement pulvérisée, ou un tube de verre en le frottant avec un morceau de drap trempé dans de l'eau acidulée. Les sons qu'on obtient ainsi d'une tige sont plus aigus que ceux que donne sa vibration transversale.

Vibration des fluides, tuyaux. — Les fluides peuvent aussi par leurs vibrations donner naissance à des sons. Ainsi, le son donné par un sifflet ou une flûte est produit par l'air qui vient se briser sur une lame solide taillée en biseau, en formant de chaque côté de ce biseau deux lames gazeuses vibrantes. Dans les tuyaux d'orgues appelés *tuyaux de flûte* (fig. 97), nous trouvons à la partie inférieure une caisse dans laquelle l'air arrive par un petit tube placé en dessous. A la face supérieure de la caisse se trouve une fente appelée la *lumière*, qui dirige l'air sur la lèvre du biseau placé au dessus. Cet assemblage constitue l'*embouchure*. C'est là que se produit le son. L'embouchure est surmontée d'un tuyau prismatique en bois de sapin ou en métal. La colonne d'air renfermée dans ce tuyau vibre à l'unisson de cette embouchure, et renforce le son qu'elle produit, pourvu, toutefois, que les dimensions du tuyau soient convenablement déterminées.


Fig. 97.

Les tuyaux dits *tuyaux à anche* (fig. 98) ont une constitution toute différente. La caisse qui reçoit l'air, appelée *porte-vent*, est un tuyau prismatique fermé à sa partie supérieure par une pièce formant bouchon. Cette pièce, creuse à l'intérieur, communique librement par le haut avec le dehors. Elle communique aussi avec la capacité du porte-vent par une fente latérale rectangulaire masquée par une petite languette en laiton qui vient battre sur les bords de la fente (anche battante), ou dans l'ouverture même (anche libre). L'air lancé dans le porte-vent presse la languette et dégage l'ouverture; mais la languette, rappelée par son élasticité, la referme de nouveau. Et comme les vibrations qu'elle exécute sont d'égale durée, il en résulte que l'air se trouve périodiquement arrêté dans son passage par l'ouverture. Les alternatives de compression et de dilatation qu'il éprouve alors le constituent lui-même dans un véritable état de vibration qui produit un son soutenu doué d'un timbre particulier, timbre que nous retrouvons encore dans le hautbois, la clarinette, le basson, le cor anglais, tous instruments à anche battante, dont la bouche de l'exécutant est le porte-vent.

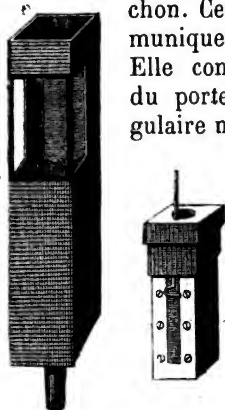


Fig. 98.

Bruit. — La tonalité d'un son ne peut être appréciée par nous, qu'autant que ce son a une certaine durée, qu'il est soutenu pendant un certain temps. S'il ne remplit pas cette condition, ce n'est plus qu'un bruit comparable à d'autres bruits, mais non point à des sons musicaux. On donne aussi le nom de bruit à un ensemble de sons entre lesquels l'oreille ne peut saisir de rapport de tonalité.

Le son ne se transmet pas dans le vide. — Pour que nous puissions percevoir le son, il faut qu'il y ait entre le corps vibrant et notre oreille un milieu matériel qui

transmette la vibration au tympan. Ainsi, quand on jette une pierre au milieu d'un étang, l'ébranlement donné à l'eau au point où la pierre est tombée se communique de proche en proche tout autour de ce point jusqu'aux parties les plus éloignées. La transmission dans l'air de la vibration du corps sonore se fait à peu près de la même manière.

Toutes les fois qu'un corps vibrera dans le vide, il n'y aura aucun son de produit. Pour le démontrer, prenons un ballon en verre d'une assez grande capacité, et muni d'une douille à robinet (fig. 99). A cette douille est suspendue une petite clochette qui occupe à peu près le centre du ballon. On rattache par un tube de plomb le robinet du ballon à la machine pneumatique, et l'on y fait le vide aussi complet que possible. En agitant la clochette, on n'obtient aucun son. Si on laisse rentrer l'air, le son devient perceptible, et prend une intensité d'autant plus grande, qu'on a laissé rentrer une plus grande quantité d'air. On pourrait encore faire l'expérience, en plaçant sur la platine de la machine pneumatique un timbre dont le marteau est mis en mouvement par un rouage d'horlogerie. Au fur et à mesure que les pistons raréfient l'air, le son diminue d'intensité. Il ne s'éteint jamais complétement cependant, parce qu'il est impossible de faire le vide parfait, et que, malgré la précaution que l'on prend de faire reposer le support du timbre sur des corps mous, le mouvement vibratoire se communique toujours à la platine, et par suite à l'air du dehors.

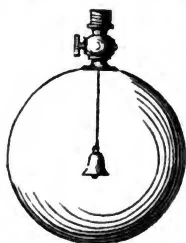


Fig. 99.

Ces expériences nous expliquent ce fait, si souvent observé dans les voyages aérostatiques et dans les ascensions sur des montagnes élevées, qu'à ces hauteurs la voix humaine s'éteint presque complétement, et que l'explosion d'un pistolet ne fait plus qu'un bruit très-faible.

Les liquides et les solides transmettent le son comme

l'air et les gaz. Ainsi, le plongeur qui s'enfonce dans l'eau en tenant à la main deux pierres qu'il heurte l'une contre l'autre, entend parfaitement le bruit qu'elles font en se choquant. De même, en appuyant l'oreille à l'extrémité d'une longue poutre, on distingue très-nettement le bruit produit par une pointe d'épingle qui gratte le bois à l'autre extrémité, bruit qu'on n'entendrait nullement s'il devait être transmis seulement par l'air. Tout le monde sait à quelle distance prodigieuse on entend la marche d'un convoi sur un chemin de fer quand on place l'oreille à une petite distance des rails.

Vitesse du son.— Cette propagation est bien loin d'être instantanée. Aussi, lorsque nous voyons tirer un coup de canon à une certaine distance, n'entendons-nous le bruit de l'explosion que quelque temps après avoir vu la flamme produite par la poudre ; et le temps qui séparera ces deux phénomènes, perçus, le premier par notre œil, le second par notre oreille, sera d'autant plus grand, que la pièce sera plus éloignée ; si bien qu'en se plaçant en ligne avec une file de tirailleurs espacés de quelques mètres et tirant ensemble leur coup de fusil à un signal donné, non pas à leur oreille, mais à leur vue, on entendra une suite distincte de détonations. C'est encore pour cette raison que le bruit du tonnerre ne se fait entendre qu'un certain temps après que l'éclair a brillé, et l'on peut juger de l'éloignement des nuages orageux par le temps plus ou moins long qui s'écoule entre l'éclair et le tonnerre.

La lumière, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, parcourt environ 70 000 lieues par seconde. Il en résulte qu'un phénomène lumineux qui s'accomplit à une lieue, à dix lieues et même à cent lieues de nous, peut être considéré comme vu par nous au moment même où il s'accomplit, puisqu'il nous est absolument impossible d'apprécier un 70000e, un 7000e, ou même un 700e de seconde. Il devient alors facile de mesurer la vitesse du son.

Voici comment cette détermination a été faite : les ob-

servateurs se sont partagés en deux groupes ; l'un des groupes occupait, avec une batterie de canons, le sommet de la colline de Montlhéry ; l'autre groupe placé sur les hauteurs de Villejuif avait également une batterie, et les coups de canon étaient tirés de cinq minutes en cinq minutes, alternativement à l'une et à l'autre des stations. Les observateurs de chaque groupe notaient sur d'excellents chronomètres le temps qui s'écoulait entre le moment où ils apercevaient le feu de la batterie et le moment où ils entendaient le bruit. La distance des deux stations était de 18 612^{m},17. En faisant la moyenne arithmétique de tous les nombres donnés par l'observation pour le temps écoulé, on trouva que le son mettait à parcourir cette distance 54 secondes $\frac{6}{10}$. Il ne restait plus qu'à diviser la distance par le nombre de secondes pour avoir l'espace parcouru par le son en une seconde dans l'air. Cette vitesse de transmission est de 340 mètres par seconde. Elle change d'ailleurs un peu avec l'état de température de l'air.

On a déterminé par un procédé analogue la vitesse de transmission dans l'eau; elle est d'environ 1430 mètres, c'est-à-dire plus de quatre fois plus grande que dans l'air. Dans les solides la propagation est plus rapide encore.

Mode de propagation.— Quant au mode de transmission, voici comment l'on s'en rend compte : si l'on considère une petite portion plane de la surface du corps vibrant se déplaçant, par le fait de la vibration, de *ab* en *a'b'*, cette petite plaque donne dans son mouvement de *ab* en *a'b'*, une succession continue d'impulsions comprimantes à la couche d'air immédiatement en contact; celle-ci, après chaque compression partielle, revient par son élasticité à son état primitif, en comprimant la couche suivante, qui à son tour revient à son premier état en comprimant la 3e couche, et ainsi de suite, le mouvement de compression se transmettant ainsi de proche en proche et s'éteignant en arrière à mesure qu'il se propage en avant.— Ensuite la petite lame revient de *a'b'* en *ab*, et alors la couche d'air en contact se dilate, puis revient à son volume et à sa densité ; la seconde couche prenant à son tour ce même mouvement, le

transmet de la même manière à la troisième; de sorte que le mouvement de dilatation se propage dans l'air, en poursuivant pour ainsi dire le premier mouvement. La lame revient après cela de *ab* en *a'b'*, puis de *a'b'* en *ab*, et ainsi de suite indéfiniment. Une couche d'air prise à une distance quelconque du centre d'ébranlement passe par les mêmes alternatives périodiques de compression et de dilatation que la couche en contact avec le corps vibrant, mais avec un retard d'autant plus grand que sa distance au corps en question est plus considérable. Si l'on prend la lame *ab* dans ses deux positions extrêmes successives *ab*, *a'b'*, positions qu'elle occupe à un intervalle de temps égal à la durée *t* d'une vibration simple, les impulsions qu'elle donne dans ces deux positions se transmettent dans l'espace, séparées l'une de l'autre par cet intervalle de temps *t*, par conséquent par la distance de $t \times 340$ mètres. — C'est là ce que l'on appelle la longueur d'une *onde condensée*, et ce mot de condensée indique précisément l'état de compression où se trouvent les couches intermédiaires. Puis à cette onde succède une *onde dilatée* de même largeur, correspondante au retour de la lame de *a'b'* en *ab*, retour qui se fait dans le même temps *t*. Ces deux ondes et toutes celles qui les suivent, alternativement condensés et dilatées, se propagent dans la direction perpendiculaire à *ab* avec la vitesse de 340 mètres par seconde. Il en est de même dans toutes les directions autour du centre d'ébranlement; de telle sorte que si l'on veut avoir la position dans l'espace des points qui reçoivent à un moment donné le même ébranlement venant du corps vibrant, il faut les prendre sur une surface de sphère dont le rayon est égal à 340 mètres multiplié par le temps qui s'est écoulé entre le mouvement où l'ébranlement a eu lieu dans le corps vibrant, et le moment que l'on considère.

Il faut bien remarquer que l'air ne se déplace pas, qu'il n'éprouve qu'un mouvement de vibration sur place. L'onde n'est pas une masse d'air qui se transporte.

Réflexion du son. Écho. Résonnance. — Lorsque le son rencontre un obstacle d'une certaine étendue, comme un mur, un édifice élevé, un rideau d'arbres, il se réfléchit, c'est-à-dire que le mouvement vibratoire qui s'est jusqu'alors propagé en s'éloignant de plus en plus du centre d'ébranlement A (fig. 100), prend une marche de

propagation inverse comme s'il venait alors d'un centre symétrique placé en B derrière l'obstacle. Ainsi un observateur placé en A, et frappant dans ses mains, entendra d'abord le son au moment même où il le produit, puis il l'entendra une seconde fois par la réflexion sur le mur MN; et cela au bout d'un temps d'autant plus long que le mur sera plus éloigné de lui. Si le mur est à 170 mètres, il faudra une demi-seconde au son pour aller de A au mur, puis une demi-seconde pour qu'il vienne repasser par le point A; il s'écoulera donc une seconde entre l'audition du premier bruit et celle du second.

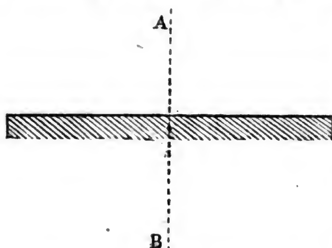


Fig. 100.

Le plus grand nombre de syllabes distinctes qu'on puisse émettre en une seconde est de 10; de sorte que l'émission de chaque son syllabique peut durer en moyenne 1/10e de seconde. Si le mur est à 17 mètres, le son réfléchi mettra 1/10e de seconde à aller et à revenir, et il viendra alors continuer sans interruption le son entendu au moment même de l'émission. Si la distance est moindre, le son réfléchi se superposera au son direct et augmentera son intensité. C'est là ce que l'on appelle une *résonnance*. Si la distance est plus grande, les deux sons seront complétement distincts; il n'y aura plus résonnance, mais *écho*. On comprend facilement que si l'obstacle qui fait l'écho est à 170 mètres, on pourra, en prononçant un mot de dix syllabes, l'entendre répéter tout entier par l'écho, puisque la première syllabe rapportée par la réflexion n'arrivera au point A qu'après une seconde, c'est-à-dire quand la dixième syllabe aura été prononcée.

Il arrive quelquefois que le son, après une première réflexion, en subit une seconde, une troisième, etc. Le même bruit peut alors se trouver répété plusieurs fois.

On connaît des échos multiples qui peuvent répéter jusqu'à dix ou douze fois un même mot. C'est en partie à ces échos et à ces résonnances multiples qu'il faut attribuer la durée, quelquefois très-considérable, du bruit du tonnerre, et surtout les roulements et les variations d'intensité si remarquables qu'il présente dans certains cas. Tout fait écho alors, les aspérités du sol et les nuages eux-mêmes.

Le *porte-voix* qui sert à envoyer le son émis par la bouche à une grande distance, et les *cornets acoustiques*, qui ont au contraire pour but de l'amener aux oreilles paresseuses, sont fondés sur les lois de la réflexion du son.

Détermination des nombres de vibration. — Pour mesurer le nombre de vibrations correspondant à un son donné on peut employer plusieurs méthodes.

La *roue dentée* de Savart est une roue en acier garnie sur sa circonférence de dents exactement égales, et également espacées. On imprime à cette roue un mouvement de rotation plus ou moins rapide et dont on peut apprécier la vitesse à l'aide d'un compteur. On présente aux dents de la roue une carte ou une petite lame de laiton, qui, à chaque dent qui passe, exécute deux mouvements vibratoires, l'un en s'abaissant, l'autre en se relevant. Le passage de 100 dents produit donc 200 vibrations. On augmente la vitesse de la roue jusqu'à ce que le son très-distinct donné par la vibration de la carte arrive à être identique de tonalité avec celui qu'on veut mesurer, et on la maintient constante pendant un temps un peu long. Admettons qu'en 4 minutes la roue qui porte 100 dents ait fait 630 tours complets, il y a eu alors 630 $\times$ 100 ou 63000 dents heurtées par la carte, ce qui représente 126000 vibrations pour 4 minutes, ou 240 secondes; c'est donc 525 vibrations par seconde.

On peut encore se servir des lois établies par le calcul et par l'expérience sur les vibrations transversales des cordes. Les nombres de vibrations fournis par des cordes de même nature, de même diamètre, également tendues,

mais de longueurs différentes, sont en raison inverse de ces longueurs. On tend alors sur une tablette entre deux chevalets distants d'un mètre, deux cordes de laiton parfaitement identiques, et l'on règle leur tension de telle sorte que le son qu'elles fournissent l'une et l'autre soit parfaitement à l'unisson d'un diapason donnant l'*ut* le plus grave du violoncelle (256 vibrations par seconde). Maintenant, glissant un chevalet mobile sous l'une des cordes, on raccourcit la longueur de la partie vibrante jusqu'à ce que le son que l'on tirera de cette corde avec un archet soit à l'unisson de celui qu'on veut mesurer. Admettons que la longueur de cette partie vibrante, que l'on mesure sur une échelle établie entre les deux chevalets, ne soit plus que 45 millimètres, alors le nombre de vibrations sera par seconde de $\frac{256000}{45}$ vibrations ou 5688 ; car la corde, réduite de la longueur d'un mètre à celle d'un millimètre, donnerait 256000 vibrations ; donc celle de 45 millimètres de longueur en donnera $\frac{256000}{45}$. Il est bon, après lecture faite du nombre de millimètres, de supprimer le chevalet, pour s'assurer que la tension de la corde n'a pas été modifiée, en comparant le son qu'elle fournit à celui de la seconde corde.

On emploie aussi l'instrument de M. Cagniard-Latour, appelé *sirène ;* ou encore, comme l'a fait M. Wertheim, des tiges vibrantes dont l'extrémité libre porte un crayon qui trace sur un tambour, animé d'un mouvement de rotation, une ligne en zigzag dont chaque brisure représente une vibration.

Intervalles de la gamme.—Les sons de notre gamme musicale ont entre eux des rapports purement de convention, rapports qui n'ont pas toujours été les mêmes de tout temps, car les anciens admettaient des intervalles plus petits que les nôtres. Cependant la fixation de ces intervalles n'est pas absolument arbitraire, l'oreille ne pouvant saisir entre les sons que des rapports assez simples, surtout quand les sons sont simultanés et forment *harmonie.*

Par rapport entre les sons nous entendons rapport

entre les nombres de vibrations exécutées dans un même intervalle de temps.

Les musiciens emploient deux espèces de gamme, *gamme majeure*, *gamme mineure*. Le premier degré de la gamme, celui qui sert de repos à la mélodie, est appelé *tonique*. En prenant pour terme de comparaison, pour unité, le nombre de vibrations accomplies dans une seconde par le corps qui produit ce son, les autres sons de la gamme majeure ascendante et descendante seront représentés par les nombres donnés dans le tableau suivant :

Gamme majeure.

Tonique.	2e degré.	3e degré, médiante.	4e degré.	5e degré, dominante.	6e degré.	7e degré, sensible.	8e degré, octave.
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

Seconde.
Tierce.
Quarte.
Quinte.
Sixte.
Septième.
Octave.

Si nous prenons l'intervalle d'un son au son précédent, en calculant le rapport de leurs nombres de vibrations, nous avons les nombres suivants pour caractériser ces intervalles :

1 — $\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$ — $\frac{5}{4}$	$\frac{5}{4}$ — $\frac{4}{3}$	$\frac{4}{3}$ — $\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$ — $\frac{5}{3}$	$\frac{5}{3}$ — $\frac{15}{8}$	$\frac{15}{8}$ — 2
$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}\times\frac{8}{9}=\frac{10}{9}$	$\frac{4}{3}\times\frac{4}{5}=\frac{16}{15}$	$\frac{3}{2}\times\frac{3}{4}=\frac{9}{8}$	$\frac{5}{3}\times\frac{2}{3}=\frac{10}{9}$	$\frac{15}{8}\times\frac{3}{5}=\frac{9}{8}$	$2\times\frac{8}{15}=\frac{16}{15}$
Ton majeur.	Ton mineur.	$\frac{1}{2}$ ton majeur.	Ton majeur.	Ton mineur.	Ton majeur.	$\frac{1}{2}$ ton majeur.

Ainsi en négligeant, comme on le fait en musique, la différence qui existe entre le ton majeur et le ton mi-

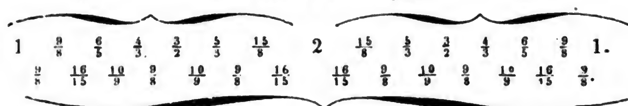
neur[1], on voit que la gamme majeure se compose de cinq tons, et de deux demi-tons majeurs placés entre le troisième et le quatrième degré, et entre le septième degré et le huitième.

La gamme majeure est identiquement la même en descendant et en montant.

Quant à la gamme mineure, elle diffère d'abord de la gamme majeure, et de plus, elle n'est pas toujours la même en descendant qu'en montant. Ces irrégularités donnent aux mélodies écrites dans le mode mineur un caractère tout autre que celui des mélodies en majeur. Voici les intervalles de la gamme mineure ascendante, et ceux de la gamme descendante sous ses trois formes les plus habituelles, en prenant toujours pour unité le nombre de vibrations de la tonique.

FORME RÉGULIÈRE.

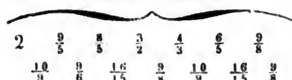
Intervalles à la tonique.

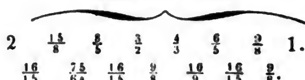


Intervalles des sons consécutifs.

GAMME DESCENDANTE. — FORMES IRRÉGULIÈRES.

Première forme. **Deuxième forme.**





Nous retrouvons encore dans cette gamme cinq tons, et deux demi-tons. Le premier demi-ton est placé dans la gamme ascendante, entre le 2e et le 3e degré, au lieu d'être comme dans la gamme majeure entre le 3e et le 4e. La tierce se trouve affaiblie; elle devient mineure, et

1. Si l'on prend le rapport entre $\frac{9}{8}$ et $\frac{10}{9}$, on trouve $\frac{9}{8} \times \frac{9}{10}$ ou $\frac{81}{80}$. Cette différence de $\frac{1}{80}$, du nombre de vibrations, est ce que l'on appelle le *comma* négligeable.

caractérise la gamme mineure ascendante et descendante.

Quant au second demi-ton, il a dans la gamme ascendante la même position que dans la gamme majeure, entre le 7ᵉ et le 8ᵉ degré ; dans la gamme descendante, il est placé soit entre le 7ᵉ et le 8ᵉ, soit entre le 5ᵉ et le 6ᵉ ; la 3ᵉ forme, qui est la plus irrégulière admet même un intervalle d'un ton et demi entre le 6ᵉ et le 7ᵉ degré.

Pour le physicien, non-seulement les intervalles musicaux, mais encore les sons eux-mêmes sont déterminés. Ils appellent *ut* ou *do* tout son dont le nombre de vibrations est un produit de facteurs égaux à 2, ou une puissance de 2. Ainsi, 2—4—8—16—32—64....—512—1024, sont des *ut* formant octaves les uns sur les autres ; alors les autres degrés prennent les noms suivants :

Tonique.	2ᵉ degré.	Médiante.	4ᵉ degré.	Dominante.	6ᵉ degré	Sensible.	Octave.
ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*

le *la* de la 10ᵉ octave sera $512 \times \frac{5}{3} = 853$.

Pour les musiciens, les sons n'ont pas la même fixité ; ainsi le *la* donné par le diapason de l'Opéra à Paris n'est pas le même que le *la* de l'Opéra italien, de l'Opéra-Comique, de l'Opéra de Berlin ou de Milan.

Une note quelconque de cette gamme qui a *ut* pour tonique, peut devenir la tonique d'une autre gamme ; seulement il est facile de voir alors que les sons de la gamme d'*ut* ne suffiront plus, tels qu'ils sont, pour former la nouvelle gamme. Ainsi écrivons deux octaves successives de la gamme majeure en *ut* en donnant les intervalles :

Ut ré mi fa sol la si ut ré mi fa sol la si ut.

$\frac{9}{8}$ $\frac{10}{9}$ $\frac{16}{15}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{10}{9}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{16}{15}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{10}{9}$ $\frac{16}{15}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{10}{9}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{16}{15}$.

Si nous voulions prendre le *sol* comme tonique d'une nouvelle gamme majeure, nous pourrions, en négligeant

la différence du *comma*, conserver les notes *la*, *si*, *ut*, *ré*, *mi*, car ils nous présenteraient le demi-ton majeur entre le 3e et le 4e degré, comme il doit l'être dans toute gamme majeure. Mais l'intervalle du 4e au 7e degré, ici du *mi* au *fa*, ne serait qu'un demi-ton, tandis qu'il doit être d'un ton, et au contraire l'intervalle du 7e au 8e degré, ici du *fa* au *sol*, serait d'un ton entier, tandis qu'il ne doit être que d'un demi-ton. On fait disparaître cette irrégularité en élevant le *fa* d'un demi-ton mineur, ce qui se fait en multipliant son nombre de vibrations par $\frac{25}{24}$. C'est là ce que l'on appelle *diéser* une note.

Si l'on prenait au contraire le *fa* pour point de départ, on trouverait que le premier demi-ton majeur n'est pas à sa place, qu'il serait entre le 4e et le 5e degré, au lieu d'être entre le 3e et le 4e. Il faudrait alors, pour rétablir les intervalles à leur position régulière, abaisser le *si* d'un demi-ton mineur en multipliant son nombre de vibrations par $\frac{24}{25}$. On le rendrait *bémol*.

———

CHAPITRE X.

DILATABILITÉ DES CORPS PAR LA CHALEUR. THERMOMÈTRE.

Lorsqu'un corps est soumis à l'action d'un foyer de chaleur, il éprouve certaines modifications physiques, qui, sauf l'intensité de l'effet produit, sont les mêmes pour toutes les substances. Nous ne voulons point parler ici des phénomènes qui entraînent un changement dans la nature du corps, des décompositions ou des combinaisons que la chaleur peut déterminer : ces faits sont du ressort de la chimie. Nous n'entendons parler que des altérations physiques.

Ainsi, lorsqu'un morceau de fer est fortement chauffé à un bon feu de forge, il prend successivement diverses teintes et finit par répandre une vive lumière. Si on le laisse refroidir, cet état d'incandescence disparaît et le fer repasse par les mêmes nuances en sens inverse, rouge blanc, rouge cerise, rouge sombre, puis il reprend enfin son aspect primitif.

Si l'on chauffe un morceau de plomb dans une cuiller en fer, on le voit, à un instant donné, quitter l'état solide pour devenir liquide. Un glaçon exposé devant le feu se liquéfie promptement, et si, après qu'il est devenu liquide, on continue encore à le chauffer, l'eau qu'il a fournie se met à bouillir et se transforme en vapeur.

Dilatation des corps.—Voilà des phénomènes faciles à saisir et à constater; mais il en est d'autres encore, moins immédiatement observables, et qui cependant n'ont pas pour cela une moindre importance. Il ne faudrait pas croire, par exemple, que le morceau de plomb n'éprouve aucun changement avant le moment où il devient liquide; que l'eau reste identiquement ce qu'elle était d'abord,

jusqu'à l'instant où elle se transforme visiblement en fluide élastique.

Il est facile, en effet, de montrer que tous les corps solides, liquides ou gazeux, augmentent de dimensions quand on les chauffe. Nous allons d'abord montrer comment on peut rendre sensible l'effet de la dilatation sur l'une des dimensions du corps. Nous nous servirons pour cela d'un petit instrument appelé *pyromètre* à cadran (fig. 101).

Une tige métallique est placée sur des montants; l'un d'eux porte une vis de pression qui maintient l'une des

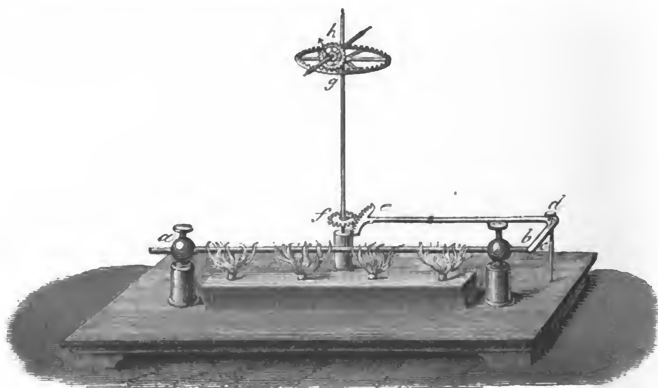


Fig. 101.

extrémités de la tige complétement fixe; l'autre laisse passer librement la seconde extrémité de la tige qui vient s'appuyer contre la plus petite branche d'une sorte d'équerre en laiton, mobile autour de son angle; la seconde branche de cet équerre, dix fois aussi longue que la petite se termine par un arc denté *e*, qui engrène avec un très-petit pignon horizontal *f*; ce pignon se rattache par sa tige verticale à une autre roue dentée *g*, d'un diamètre plus grand; laquelle engrène à son tour avec un pignon vertical *h* qui porte une aiguille mobile au centre d'un cadran divisé. Mettons que l'extrémité *b* avance d'un mil-

limètre; les deux branches de l'équerre vont se trouver déplacées du même angle, l'une sur une circonférence d'un centimètre de rayon, l'autre sur une circonférence de 10 centimètres; l'extrémité *e* tournera donc de 10 millimètres. Supposons que l'arc *e* porte 8 dents sur cette longueur de 10 millimètres, et que *f* porte à son pignon 8 dents également; alors *f* fera un tour entier ainsi que la roue *g*. Si *g* porte 32 dents et *h* seulement 8, alors *h* fera 4 tours entiers. On voit combien cet appareil est sensible, puisque, en supposant que son cadran porte seulement 250 divisions, un allongement d'un millimètre de la tige fait parcourir 4×250 ou 1000 divisions du cadran. Un déplacement de l'aiguille d'une division seulement rendrait donc apparent un allongement d'un millième de millimètre.

Pour mettre l'appareil en expérience on place la tige, comme nous l'avons indiqué, en la faisant appuyer sur le levier coudé, de manière que l'aiguille soit au zéro du cadran. Puis on place sous la tige une longue caisse rectangulaire pleine d'esprit-de-vin et garnie de plusieurs mèches. On enflamme l'alcool, et l'on voit immédiatement l'aiguille se mettre en marche sur le cadran et parcourir un assez grand nombre de divisions, quelquefois une circonférence tout entière, selon la nature du métal qui compose la tige, ou l'activité de la flamme. Si on éteint l'alcool, la tige se refroidit et se contracte. Aussi voit-on l'aiguille revenir sur ses pas, rappelée par un petit contrepoids qui tire sur son pignon et force la branche *c* à appuyer toujours sur l'extrémité *b* qui se retire.

On conçoit que cet instrument, construit avec précision, peut servir non-seulement à faire voir la dilatation en longueur des corps solides, mais aussi à la mesurer.

Pour montrer la dilatation dans tous les sens, prenons une pièce de métal conique et un anneau, soit de même métal, soit d'un métal différent (fig. 102); nous passerons l'anneau sur le cône et nous verrons à quel point de la hauteur du cône il vient affleurer; nous marquerons un trait sur le cône au point d'affleurement. Si mainte-

nant, laissant l'anneau froid, nous chauffons fortement le cône, nous verrons qu'en replaçant ensuite l'anneau, il s'arrête bien au-dessus du trait d'affleurement. Cela prouve évidemment l'accroissement en diamètre du cône. Si nous avions laissé le cône froid et que nous eussions chauffé l'anneau, nous verrions, au contraire, qu'en replaçant l'anneau sur le cône, il entrerait plus profondément, preuve que le diamètre intérieur de l'anneau a augmenté aussi bien que son diamètre extérieur.



Fig. 102.

Il suit de là qu'un vase, pouvant être considéré comme formé d'anneaux superposés, devra, par l'action de la chaleur, augmenter de capacité intérieure, en même temps que de diamètre extérieur.

Il y a plus : si le cône et l'anneau sont de même substance, et chauffés également, mais séparément, dans une même étuve, par exemple, on verra qu'en les représentant l'un à l'autre, l'anneau se retrouvera au niveau du trait d'affleurement. Cela prouve que le diamètre intérieur de l'anneau a reçu exactement le même accroissement que le diamètre extérieur du disque compris sous le trait d'affleurement. Étendant ceci à un vase, on en conclut que le volume intérieur d'un vase augmente comme augmenterait le volume d'une masse de la même substance qui remplirait sa capacité.



Fig. 103.

Le phénomène de la dilatation se constate aussi très-facilement pour les liquides. Prenons un ballon de verre soudé à un tube d'assez petit diamètre (fig. 103), et rempli de liquide jusqu'en *a*; et plongeons-le dans de l'eau un peu chaude, nous verrons le niveau s'élever rapidement dans le tube, au point que le liquide peut même sortir du tube par l'extrémité supérieure. Si la capacité du vase ne changeait pas par l'action de la chaleur, l'expérience

démontrerait déjà que le volume du liquide a augmenté; mais nous savons que la capacité du vase est même devenue plus grande; l'ascension du niveau du liquide prouve donc *a fortiori* que le liquide se dilate, et en outre qu'il se dilate plus que le corps solide qui forme l'enveloppe. S'il arrivait que le liquide se dilatât autant seulement que l'enveloppe solide, alors le niveau resterait en affleurement au même point du tube. Et si, par extraordinaire, le liquide se dilatait moins que le solide, alors il y aurait abaissement *apparent* du niveau. Au surplus, comme les solides se dilatent notablement moins que les liquides, l'effet produit est toujours une élévation du niveau.

Il arrive cependant quelquefois que le liquide commence par descendre un peu pour remonter ensuite, surtout si l'échauffement est brusque. Cela tient à ce que l'enveloppe, recevant la première l'impression de la chaleur, s'échauffe et se dilate avant le liquide. Le niveau doit alors descendre; mais une fois que la chaleur a pénétré jusqu'au liquide, celui-ci se dilatant plus que le solide, le niveau monte rapidement.

Concluons de tout ce que nous venons de dire que l'élévation du niveau ne donne point la véritable dilatation du liquide. Elle mesure ce que l'on est convenu d'appeler la *dilatation apparente du liquide dans l'enveloppe*. A cette dilatation apparente il faudrait évidemment ajouter la dilatation subie par la portion du vase qui contient le liquide, pour avoir la dilatation réelle de ce liquide. La dilatation réelle est indépendante de la nature du vase; mais la dilatation apparente dépend évidemment de la nature de l'enveloppe, puisqu'elle pourrait être nulle si le vase se dilatait autant que le liquide.

Pour démontrer la dilatation des gaz, nous emploierons un moyen analogue. Nous prenons un ballon en verre fermé par un bouchon (fig. 104); ce bouchon est traversé par un tube replié en S et contenant dans sa courbure un liquide quelconque. Les deux niveaux *a*, *b*, sont à la même hauteur. Si l'on plonge le ballon dans de

l'eau tiède, on voit le niveau s'abaisser en *a* et monter en *b*; bientôt le premier niveau arrive au bas de la courbure, et alors le gaz s'échappe en bulles au travers du liquide. Comme il est démontré que le vase augmente de capacité, la sortie du gaz prouve qu'il se dilate, et qu'il se dilate même plus que le vase. Lorsqu'on laisse ensuite refroidir le ballon, le niveau *a* remonte, et le niveau *b* redescend, ce qui indique à la fois la diminution du volume et la diminution d'élasticité de l'air confiné. Le niveau *b* descend au-dessous de sa position primitive à cause de la sortie de l'air; il arrive à la courbure inférieure, et alors l'air du dehors rentre au travers du liquide, bulle par bulle.

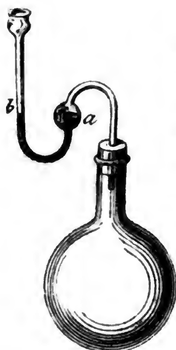


Fig. 104.

Variation de la force élastique des gaz.—Si le gaz pouvait se dilater sans obstacle, sa communication avec l'air extérieur étant complétement libre, son élasticité ne changerait point; elle serait égale, lorsque le gaz se trouverait arrivé à son maximum d'expansion, à la pression atmosphérique. Il suit de là que si le gaz est renfermé dans une enveloppe close et inextensible, il doit prendre, par l'action de la chaleur, une élasticité croissante. Si l'échauffement est tel, par exemple, que le volume du gaz dût doubler par la dilatation libre, alors le gaz enfermé prendra une élasticité double. En effet, il revient au même de supposer que le gaz reste tout le temps sous son volume primitif, ou bien d'admettre que le gaz se dilate librement, et qu'ensuite on le ramène à son premier volume; or, pour le ramener à ce volume, il faudrait doubler la pression et par suite l'élasticité. Donc la chaleur a pour effet d'augmenter l'élasticité d'un gaz contenu sous un volume invariable, dans le même rapport suivant lequel elle augmenterait son volume, si la dilatation était libre.

Il ne faut donc point s'étonner si une boule de verre fermée et pleine d'air éclate avec explosion lorsqu'on la

laisse quelques instants dans la bouche de chaleur d'un poêle, ou qu'un flacon trop bien fermé se brise quand il se trouve exposé à une chaleur un peu forte.

Il va de soi-même que si, au lieu de chauffer le gaz, on le refroidissait, il éprouverait une diminution dans sa force élastique d'autant plus grande que le refroidissement serait plus considérable.

Température. — Thermomètre. — Les différents états par lesquels passe un corps lorsqu'on fait varier la dose de chaleur qu'il renferme, s'appellent *températures*. Parmi les modifications que subissent les corps par l'action de la chaleur, il en est qui sont susceptibles d'une appréciation exacte et numérique, entre autres la variation du volume ; c'est donc par le volume du corps que nous caractériserons ses *températures*. Nous mesurerons la variation de la température par les variations du volume, et nous admettrons que toutes les fois qu'un corps reprend, sans être soumis à aucune action *mécanique*, le même volume, il se retrouve au même état calorifique, à la même température, et réciproquement.

Lorsqu'on met en présence l'un de l'autre deux corps inégalement chauds, nous constatons que le corps le plus chaud se refroidit, et que l'autre s'échauffe : puis il arrive un moment où ces changements ne se manifestent plus, et où les deux corps conservent un état de température stationnaire. On dit alors que ces deux corps sont *à la même température*. Les mêmes phénomènes s'accomplissent avec un nombre quelconque de corps. Certains d'entre eux se refroidissent, les autres s'échauffent; quand leur état de température devient fixe, on les dit tous à la même température. Il suffira alors qu'il y ait parmi ces corps un corps dont on connaisse la température : cette température sera en même temps celle de tous les autres. C'est là précisément le but que remplit l'instrument appelé *thermomètre*.

Les corps solides sont impropres à servir de thermomètre, ils sont trop peu dilatables. On ne peut les employer que pour mesurer de grandes variations de températures,

et quand on n'a pas besoin d'une grande précision; le pyromètre à cadran, dont nous avons parlé déjà dans ce chapitre, s'emploie quelquefois pour mesurer la température des fours à cuire la porcelaine. La tige métallique est établie dans le four, et met en mouvement l'équerre mobile par l'intermédiaire d'une tige de porcelaine qui fait l'office de rallonge.

Les gaz sont, au contraire, trop dilatables, et en outre leur volume varie non-seulement avec la température, mais encore avec la pression extérieure; il faut donc un calcul préalable pour tenir compte du changement de pression.

Thermomètre à mercure.—Les thermomètres usuels sont construits soit avec le mercure, soit avec l'alcool. Le mercure est un corps bon conducteur de la chaleur, c'est-à-dire que la chaleur se distribue rapidement et également dans toute la masse; d'autant plus rapidement et plus également d'ailleurs que cette masse est plus petite.

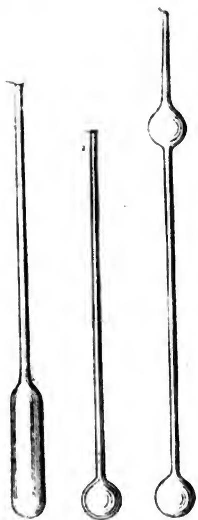


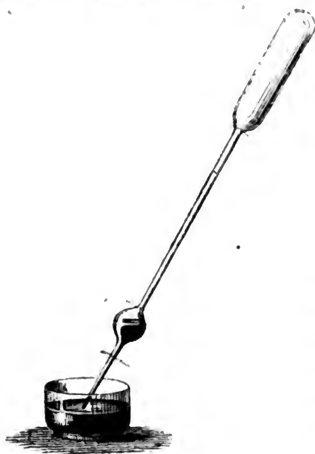
Fig. 105.

Il s'obtient facilement pur, et en outre se conserve liquide dans une limite de température assez étendue.

Le mercure est contenu dans une enveloppe en verre qui permet de voir les variations de son niveau. On a dû chercher la forme qui rendît ces variations le plus facilement appréciables. Ordinairement le thermomètre est formé d'un tube cylindrique d'un très-petit diamètre, soudé à un réservoir plus large, de forme cylindrique ou sphérique (fig. 105).

La petitesse du diamètre intérieur du tube est un obstacle à l'introduction du mercure dans l'instrument; l'air et le mercure ne peuvent se mouvoir en même temps dans un es-

pace aussi étroit, l'un pour sortir, l'autre pour entrer. Voici comment on procède : on adapte à l'extrémité du tube, opposée au réservoir, une petite boule avec un tube effilé ; on chauffe les deux boules du thermomètre pour faire sortir par la pointe le plus d'air possible, puis on plonge cette pointe dans le mercure (fig. 106). L'air, se dilatant librement, a conservé une élasticité égale à la pression atmosphérique; mais dès qu'il se refroidit, il diminue de force élastique, comme nous l'avons dit plus haut; alors la pression atmosphérique force le mercure à s'élever dans la boule provisoire. On relève ensuite le tube, et l'air enfermé, cédant sous la pression de l'air extérieur et du mercure, laisse pénétrer le liquide dans le tube et dans le réservoir inférieur. Lorsque le mercure cesse de descendre, on chauffe le thermomètre de manière à faire bouillir. Les vapeurs de mercure, beaucoup plus denses que l'air, le déplacent et le chassent du tube. On laisse refroidir, et le liquide vient remplir complétement l'instrument.


Fig. 106.

Il est évident qu'on ne doit pas garder l'instrument plein de mercure. La boule et une partie du tube seulement doivent être pleines à la température ordinaire, de manière à laisser une certaine latitude à la variation du niveau. Voici comment on s'y prend pour régler la quantité de mercure que l'on veut laisser : on choisit une certaine limite supérieure, soit par exemple la température de fusion de l'étain. On plonge le thermomètre dans un bain liquide ayant cette température, et l'on rejette du réservoir supérieur le mercure que la dilatation y a fait

arriver. Il est évident que l'instrument contient alors une quantité de mercure capable de le remplir seulement à cette température limite. On laisse ensuite refroidir le thermomètre, et si le mercure s'arrête dans le tube à une certaine distance de la boule, l'instrument sera dans de bonnes conditions de remplissage. Mais si le mercure rentrait complétement dans la boule, cela indiquerait évidemment qu'on a chassé trop de mercure, par conséquent que les dimensions relatives du tube et de la boule ne permettent pas au thermomètre d'atteindre une température aussi élevée. On rechaufferait alors de manière à faire remonter le mercure dans le réservoir supérieur, et l'on ajouterait du mercure, puis, laissant refroidir, on recommencerait l'opération en prenant une limite de température moins élevée.



Fig. 107.

On ferme alors le thermomètre ; et voici comment on procède pour ne point laisser d'air au-dessus du mercure, ce qui gênerait la dilatation : on chauffe à la flamme d'une lampe d'émailleur la partie du tube voisine de la boule provisoire, puis quand le verre est suffisamment ramolli, on étire le tube comme l'indique la figure 107. On fait ensuite chauffer le mercure de manière à le faire monter jusqu'à la partie effilée ; puis, avec un chalumeau, on lance un jet de flamme sur cette partie effilée qui se fond et se détache du tube, fermé du même coup. Le mercure, en se refroidissant, retombe à son niveau, laissant au-dessus de lui un vide à peu près complet.

Il faut maintenant établir sur la tige une graduation. Cette graduation est arbitraire comme celle des aréomètres ; mais pour que les indications des différents thermomètres soient comparables entre elles, on est convenu de les graduer tous de la même manière.

Si l'on plonge un thermomètre portant une division arbitraire dans de la glace fondante, on remarque que le mercure s'arrête toujours à la même division, et qu'il s'y fixe invariablement pendant toute la durée de la fusion.

Si de même on plonge le thermomètre en question dans de l'eau pure amenée à l'ébullition, on remarque encore que le mercure se fixe toujours à un même point de l'échelle, et que son niveau demeure invariable, pourvu que la pression atmosphérique ne change pas.

Voilà deux températures faciles à retrouver, et qui pourront servir de point de repère pour l'échelle thermométrique.

Pour graduer un thermomètre, on le dispose dans un entonnoir ou dans un vase percé de trous, et on l'entoure de neige ou de glace pure, cassée en très-petits morceaux. On attend que le mercure devienne stationnaire, et, quand on voit son niveau immobile, on marque le point d'affleurement sur la surface du tube avec un pinceau trempé dans du vermillon ou de la cire rouge fondue.

Toutes ces précautions sont indispensables, parce que, si la glace conserve sa température pendant la fusion, l'eau résultant de cette fusion peut s'échauffer et agir sur le thermomètre : de là, nécessité de la faire écouler ; parce que la glace donnée par de l'eau chargée de matières étrangères ne fond pas à la même température que la glace pure ; enfin parce que de très-gros morceaux de glace pourraient avoir en leur centre une température plus basse qu'à leur surface, et agir par conséquent pour refroidir le thermomètre au-dessous du point réel de la fusion.

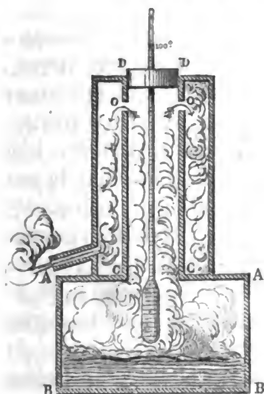


Fig. 108.

On porte ensuite le tube dans l'étuve à vapeur (fig. 108). C'est une boîte cylindrique en fer blanc ou en laiton AABB, surmontée d'un col cylindrique CCDD. La boite est remplie à moitié d'eau pure et placée sur un fourneau qui porte

l'eau à l'ébullition; le thermomètre passe dans le bouchon qui ferme le col, et se trouve en contact avec la vapeur qui s'échappe par deux petits orifices OO, et que, avant de sortir de l'appareil, tourne dans une enveloppe destinée à empêcher le refroidissement par l'air extérieur. Ces dispositions ont une importance toute aussi grande que celles que nous indiquions tout à l'heure pour la fusion de la glace. Nous les justifierons plus tard quand nous traiterons avec détails du phénomène de l'ébullition.

On a soin de tirer le tube de manière à rendre visible la surface du mercure, et quand son niveau est devenu stationnaire, on le marque de même avec un petit trait rouge.

Échelles thermométriques. — Ces deux points de repère une fois déterminés, on établit le tube thermométrique à demeure sur une planchette en bois, en verre ou en métal. On marque 0° à l'affleurement du trait rouge inférieur, 100° à l'affleurement du trait rouge supérieur[1]; on divise l'intervalle de ces deux points en 100 parties égales, et on porte des divisions égales au-dessous du zéro et au-dessus du point 100°. On appelle *degré de température* la variation de température qui fait monter le niveau du mercure de l'un quelconque des traits de cette division au trait immédiatement supérieur. L'état de température du thermomètre est indiqué par le nombre des divisions qui séparent le niveau du mercure du zéro de la graduation. Ainsi on dira que le thermomètre est à 20 degrés au-dessus de zéro (on écrit + 20), ou à 20 degrés au-dessous de zéro (on écrit — 20). On voit que la définition du degré est tout aussi bien de convention que la fixation des points de repère.

Cette division, qui est maintenant adoptée en France, est connue sous le nom de division *centigrade*. Ce mode de graduation a été substitué, après la création du sys-

1. On marque 100 si la pression atmosphérique est de $0^m,76$, sinon on a, comme nous le verrons plus tard, une correction à faire sur ce nombre.

tème métrique, à l'ancienne division donnée par *Réaumur*. Dans l'échelle thermométrique de Réaumur, les points fixes sont les mêmes; seulement ils sont marqués *zéro* et 80°, et leur intervalle est partagé en 80 parties égales.

80° Réaumur représentent donc le même intervalle de température que 100° centigrades. Ainsi 4° Réaumur valent 5° centigrades.

Il devient facile, avec cette relation, de transformer l'une dans l'autre les indications des deux échelles.

Cherchons ce que valent en degrés centigrades 32° Réaumur, et, en degrés Réaumur, 45° centigrades. Je dirai, pour la première question : 4° Réaumur valent 5° centigrades; 1° Réaumur vaut $\frac{5}{4}$ centigrades, et 32° Réaumur valent $32 \times \frac{5}{4}$ centigrades, ou 40° centigrades; pour la seconde question : 5° centigrades valent 4° Réaumur; 1° centigrade vaut $\frac{4}{5}$ Réaumur, et 45° centigrades valent $45 \times \frac{4}{5} = 36°$ Réaumur.

Les Anglais, et, avec eux, les Américains et les Russes ont adopté un autre système de graduation. Leur point fixe supérieur est le même que le nôtre : la température d'ébullition de l'eau pure sous la pression de $0^m,76$; leur point fixe inférieur correspond à la température d'un mélange de glace et de sel. Cette température est notablement inférieure à celle de notre zéro. L'intervalle de ces deux points est divisé en 212 parties égales. Notre zéro correspond à $+ 32°$ de cette échelle qu'on appelle échelle de *Farenheit*. Les 100 degrés de l'échelle centigrade occupent le même intervalle thermométrique que $212 - 32$ ou 180 degrés de Farenheit. Ainsi 100 centigrades = 80° Réaumur = 180° Farenheit, ou, en simplifiant : 5° centigrades = 4° Réaumur = 9° Farenheit.

Pour transformer des degrés Farenheit en degrés centigrades ou Réaumur, il faut d'abord ramener les échelles à avoir le même point de départ, supposer par conséquent que l'on remonte l'échelle Farenheit de 32 de ses divisions, ou, ce qui revient au même, retrancher 32 degrés du nombre donné de degrés Farenheit, ensuite tenir compte des valeurs relatives des degrés.

Soit par exemple 97° Farenheit à transformer en degrés centigrades ou Réaumur. Nous retranchons d'abord 32°, ce qui nous donne 65°.

Puis comme 9° Farenheit valent 5° centigrades et 4° Réaumur, 1° Farenheit vaudra $\frac{5}{9}$ cent. et $\frac{4}{9}$ Réaum., donc
65° Farenheit $= 65° \times \frac{5}{4}$ cent. $= 36°,11$.
$= 65° \times \frac{4}{6}$ Réaum. $= 22°,88$.

La division des thermomètres est quelquefois tracée sur le verre même à l'aide d'une machine particulière appelée machine à diviser.

Le mercure se congèle à 40° au-dessous de zéro, et bout à 350° au-dessus de zéro. On voit que l'emploi de cet instrument pour les basses températures est assez limité. L'alcool, ou esprit de vin, résistant aux froids les plus grands, on en fait surtout usage quand il s'agit d'apprécier les températures basses.

Thermomètre à alcool. — Le thermomètre à alcool se construit à peu près comme le thermomètre à mercure. On donne au tube la même forme, mais on peut se dispenser d'une boule de remplissage. On fait chauffer le réservoir et l'on plonge l'extrémité du tube dans un verre contenant de l'alcool coloré en rouge par de l'orseille. La pression atmosphérique fait monter le liquide jusque dans la boule. En faisant bouillir ainsi l'alcool introduit et plongeant une seconde fois le tube dans l'alcool, on remplit complétement le thermomètre. S'il restait encore une bulle d'air retenue dans le réservoir, on attacherait solidement le thermomètre à une corde d'un mètre de longueur, et en faisant tourner rapidement comme une fronde, on forcerait l'air à s'échapper par l'orifice du tube.

Il ne reste plus qu'à fermer le tube et à le graduer. On marque le zéro comme nous l'avons dit plus haut pour le thermomètre à mercure. On établit le thermomètre à alcool à côté d'un bon thermomètre à mercure dans un vase rempli d'eau que l'on porte graduellement à différentes températures, en y ajoutant de l'eau chaude ; on tâche de maintenir constante pendant quelques instants chacune de ces températures. On note pour chacune d'elles

l'indication du thermomètre à mercure, et l'on met un trait à l'affleurement de l'alcool. Supposons qu'on ait marqué ainsi les températures 20°, 40°, 60°, 80°, et 100°, on divisera alors chacun des intervalles en vingt parties égales, et l'échelle se trouvera tracée.

On peut se demander pourquoi l'on ne se bornerait point à marquer le zéro et la température 100° et à diviser ensuite l'intervalle en 100 parties égales. Mais si l'on graduait le thermomètre à alcool de cette manière, on verrait qu'en le comparant à un thermomètre à mercure, les deux instruments ne seraient en accord qu'à leurs points 0° et 100°, et donneraient des indications différentes pour les points intermédiaires. Cette discordance tient à l'irrégularité de la dilatation de l'alcool, et c'est pour en diminuer les effets que l'on prend plusieurs points de raccord sur l'échelle.

Irrégularité de la dilatation des liquides. — Un thermomètre construit avec de l'eau au lieu d'alcool offrirait des irrégularités bien plus grandes encore. En le mettant à côté d'un thermomètre à mercure dans de l'eau à zéro, et élevant *lentement* la température, on verrait d'abord le thermomètre à eau baisser au lieu de monter, jusqu'à ce que le thermomètre à mercure marquât 4° ; à partir de cette température l'eau remonterait, atteindrait son zéro quand le thermomètre à mercure marquerait à peu près 8°, et ensuite irait constamment, mais très-irrégulièrement en montant. On doit en conclure que, par exception à la loi générale, l'eau éprouve d'abord une contraction et par suite une augmentation de densité jusqu'à 4°, température à partir de laquelle l'eau rentre dans les conditions ordinaires, et se dilate en diminuant de densité. On a pris pour unité de densité la densité de l'eau à cette température de 4°, et l'unité de poids, le gramme, est, comme nous l'avons déjà dit, le poids de 1 centimètre cube d'eau pure prise à 4°.

Maximum de densité de l'eau. — Cette anomalie du maximum de densité de l'eau explique un fait assez curieux que présentent les masses d'eau profondes et tran-

quilles : la température des couches voisines du fond y reste invariablement à 4°, quels que soient les froids de l'hiver ou les chaleurs de l'été. Prenons le cas de l'hiver ; supposons que les froids viennent surprendre la masse d'eau : les couches supérieures se refroidiront les premières. Devenant plus froides, elles deviennent aussi plus denses et descendent alors vers le fond ; d'autres couches, les remplaçant à la surface, se refroidissent et descendent à leur tour jusqu'à ce que toute la masse soit à 4°. A partir de ce moment, les couches supérieures, qui prendront une température plus basse, au lieu de continuer à se contracter comme cela arriverait avec tout autre liquide, se dilateront au contraire, et se trouvant plus légères, devront rester à la surface. Les couches du fond, à 4°, n'étant plus déplacées, ne pourront se refroidir que par la transmission de leur calorique aux couches superficielles refroidies ; et comme l'eau immobile est un corps très-mauvais conducteur de la chaleur, cet effet ne se produira qu'avec une extrême lenteur, et la durée des froids sera ordinairement insuffisante pour modifier sensiblement l'état de température du fond. On peut reproduire en petit ces phénomènes à l'aide de l'appareil suivant, (fig. 109). Il se compose d'une éprouvette à pied en verre remplie d'eau. Un thermomètre *a* donne la température des couches supérieures : un thermomètre *b* passé dans un trou de la paroi donne la température des couches voisines du fond. Une galerie enveloppe la partie supérieure de l'éprouvette. On y met de la glace, de manière à refroidir par le contact les parois et par suite le liquide. On voit les deux thermomètres *a* et *b* descendre à peu près en même temps jusqu'à 4° ; puis le thermomètre *b* rester stationnaire à cette température, et le thermomètre *a* continuer au contraire sa marche descendante.

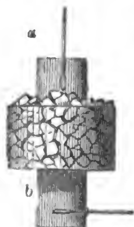


Fig. 109.

Application des dilatations. — La connaissance des dilatations des corps intéresse le physicien non pas seu-

lement au point de vue scientifique, mais encore au point de vue pratique. Lorsqu'une machine est formée de pièces métalliques de natures différentes, les variations de température apportent des changements inégaux dans les dimensions des divers organes, et si l'on n'a pas tenu compte avec soin de ces inégalités de dilatation, si l'on n'a pas laissé un jeu suffisant aux pièces, il en pourra résulter des déformations, des torsions et même des fractures. Aussi les zingueurs, au lieu de clouer sur toute leur étendue les feuilles de zinc qui recouvrent les toits, se bornent à les fixer par un petit nombre de points en laissant un jeu à ces points, et ils disposent les bords de ces feuilles de manière à ce qu'ils se recouvrent mutuellement. C'est encore pour cette raison que les rails d'un chemin de fer sont placés bout à bout sur leurs traverses avec un petit intervalle entre chaque rail et le rail suivant, pour leur permettre de se dilater librement; et que les tuyaux de conduite pour l'eau ou pour le gaz d'éclairage présentent à l'une de leurs extrémités une tête renflée qui enveloppe l'extrémité du tuyau suivant. De cette manière, les tuyaux peuvent glisser l'un sur l'autre.

Pendules compensés. — En exposant les lois qui régissent le mouvement pendulaire, nous avons dit que la durée des oscillations varie avec la longueur du pendule. Il suit de là que les variations de la température ayant naturellement pour effet de changer cette longueur, un pendule donné n'oscille pas rigoureusement de la même manière à toutes les époques de l'année. Il doit osciller plus vite en hiver, le froid diminuant sa longueur; il doit au contraire osciller plus lentement en été, puisqu'il s'allonge par l'action de la chaleur. Pour se mettre à l'abri de cette influence, qui changerait la marche des horloges, on a imaginé d'adapter au pendule des systèmes compensateurs.

Le pendule compensé d'Henry Robert se compose d'une tige en platine terminée à sa partie inférieure par un bouton sur lequel repose une lentille en zinc que traverse sans adhérence la tige de platine. Si le platine se dilatait seul, il s'allongerait faisant descendre avec lui la lentille; si au contraire le zinc se dilatait seul, le rayon de la lentille augmentant de longueur,

le centre de gravité de sa masse se trouverait relevé. Or le zinc se dilate quatre fois plus environ que le platine; il faudra donc que le rayon de la lentille soit le quart de la longueur de la tige pour que les deux effets inverses se compensent, et que le centre de gravité conserve sa distance au point de suspension, distance qui est ce que l'on appelle la longueur du pendule.

On emploie encore beaucoup le compensateur à châssis. Réduit à sa forme la plus simple, il se compose d'un cadre rectangulaire en fer suspendu par la tige *ef* (fig. 110); la barre ho-

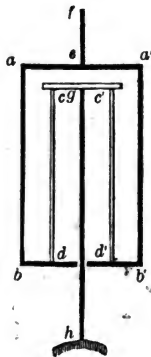
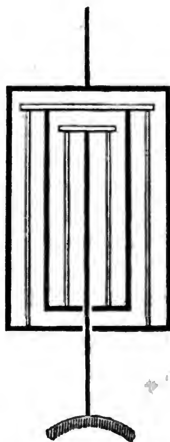


Fig. 110.


Fig. 111.

rizontale inférieure *bb'* porte un second cadre en laiton *cc' dd'*; celui-ci porte à son tour à sa traverse supérieure *cc'* la tige *gh* qui soutient la lentille. Si le fer se dilatait seul, la lentille descendrait d'une certaine quantité. Si le laiton se dilatait seul, la traverse supérieure *cc'*, remontant par l'allongement du cadre de laiton, tirerait après elle la lentille qui remonterait aussi. D'ailleurs, le laiton se dilatant plus que le fer, on conçoit qu'il puisse y avoir une compensation établie. Toutefois l'expérience a montré qu'une paire de cadres, fer et laiton, ne suffisait pas pour l'établir. Il en faut au moins deux, que l'on dispose comme l'indique la figure 111.

Lois de la dilatation. — Coefficients. — Les lois qui président à la dilatation des corps ont été l'objet de nombreux et savants travaux. Laplace et Lavoisier, Dulong et Petit, Gay-Lussac, Regnault ont apporté successivement à la détermination de ces lois et aux méthodes expérimentales d'importants perfectionnements. Nous n'entrerons dans aucun détail sur ces travaux, et nous nous contenterons d'indiquer en quelques mots les résultats principaux.

Corps solides. — On distingue pour les corps solides la *dilatation linéaire*, ou dilatation suivant une seule dimension, et la dilatation en volume, ou *dilatation cubique.*

Pour un même corps et pour une même variation de température, la dilatation en longueur est proportionnelle à la longueur, la dilatation en volume proportionnelle au volume. Pour un même corps, la dilatation, soit en longueur, soit en volume, est proportionnelle à la variation de la température, au moins entre 0° et 100°.

Il suit de là que, connaissant la fraction qui représente la dilatation de l'unité de longueur ou de l'unité de volume, prise à 0°, pour une élévation de température de 0° à 1°, on pourra calculer la variation éprouvée par un volume ou une longueur quelconque, pour une variation de température aussi quelconque. Cette fraction est ce que l'on appelle le *coefficient de dilatation linéaire* ou *cubique* du corps. Sa valeur change avec la nature de la substance. Nous donnons ici la valeur de ces coefficients pour un certain nombre de corps :

Nom des substances.	Coefficient linéaire. K.	Coefficient cubique. K.
Verre	0,0000086	0,0000258
Platine	0,0000088	0,0000264
Acier	0,0000108	0,0000324
Fonte	0,0000111	0,0000333
Fer	0,0000118	0,0000354
Or..............	0,0000151	0,0000453
Cuivre...........	0,0000171	0,0000513
Laiton...........	0,0000186	0,0000558
Argent	0,0000191	0,0000573
Étain............	0,0000217	0,0000651
Plomb	0,0000285	0,0000855
Zinc	0,0000311	0,0000933

On peut remarquer tout de suite que le coefficient cubique est triple du coefficient linéaire.

Corps solides. — Nous avons déjà distingué pour les liquides la *dilatation apparente*, qui varie avec la nature de l'enveloppe, et la *dilatation absolue* ou *réelle*, qui en est indépendante. Nous avons fait remarquer aussi que la dilatation des liquides était généralement très-irrégulière. Le mercure fait exception; sa dilatation réelle est au contraire régulière comme celle des métaux, et dans des limites au moins aussi étendues. Le coefficient de dilatation cubique du mercure est mesuré par la fraction 0,00018 environ $\frac{1}{5550}$. On voit que cette fraction est à peu près double du coefficient du métal le plus dilatable, le zinc.

Corps gazeux. — Tous les gaz ont, à quelques légères différences près, le même coefficient de dilatation 0,00367, ou $\frac{1}{273}$.

Nous indiquerons maintenant l'usage que l'on peut faire de ces nombres, et cela sur un exemple qui se présente souvent dans les expériences.

Les variations de température ayant pour effet de changer la densité du mercure, il en résulte que la colonne barométrique destinée à mesurer la pression atmosphérique varie en hauteur non-seulement avec cette pression, mais encore avec la température. Pour que les observations fussent comparables, il faudrait qu'elles fussent faites toujours à la même température, ou au moins que, connaissant la hauteur observée à une température quelconque, on pût en déduire la hauteur qu'aurait eue la colonne si la température était toujours restée la même, par exemple 0°. Voici comme on fera cette correction : Soit 756,16 la hauteur observée à 12°, quelle serait la hauteur, le mercure étant à zéro ?

D'après des principes connus, la hauteur du mercure à 12° et la hauteur du mercure à zéro, qui font équilibre à la même pression, sont dans le rapport inverse des densités du liquide à ces deux températures

$$\frac{H_{12^\circ}}{H_{0^\circ}} = \frac{D_{0^\circ}}{D_{12^\circ}}.$$

Or, d'un autre côté, les densités d'un corps à deux températures différentes sont en raison inverse des volumes que prendrait à ces deux températures une même masse de ce corps, soit par exemple la masse dont le volume serait l'unité à zéro. De 0° à 1° l'unité de volume du mercure augmente de la quantité K (coefficient de dilatation = 0,00018), de 0° à 12° elle augmen-

tera de 12K; elle sera donc devenue à 12° $1+12K$ ou $1+12 \times 0{,}00018 = 1{,}00216$. J'ai donc

$$\frac{H_{12}}{H_0}=\frac{D_0}{D_{12}}=\frac{V_{12}}{V_0}=\frac{1+12K}{1}=1{,}00216.$$

Donc

$$H_0=\frac{H_{12}}{1{,}00216}=\frac{756{,}16}{1{,}00216}=754{,}50.$$

Nous donnerons à la fin du volume quelques problèmes sur ces questions de dilatation, qui trouvent de fréquentes applications dans la science et même dans la pratique. Pour aider à trouver leur solution, comme celle de tous les problèmes de ce genre, nous ferons remarquer qu'ils reposent presque tous sur des comparaisons de volumes, ou de densités ou d'élasticités. Or, les densités d'un même corps, solide, liquide ou gazeux, à des états de température différents, sont, nous le savons, en raison inverse des volumes que prend à ces températures une même masse de ce corps. D'un autre côté, les élasticités d'un gaz renfermé, à des températures différentes, sont entre elles comme les volumes qu'il prendrait s'il se dilatait librement. De sorte que ces trois genres de questions se réduisent à un seul : la comparaison des volumes d'une même masse, quelconque d'ailleurs. En choisissant celle dont le volume à zéro serait l'unité, on voit que son volume à t^0 est $1+K.t$; à t'^0, $1+K.t'$. On a donc pour résoudre tous ces problèmes les relations très-simples :

$$\frac{E_{t'}}{E_t}=\frac{D_t}{D_{t'}}=\frac{V_{t'}}{V_t}=\frac{1+K.t'}{1+K.t}.$$

CHAPITRE XI.

CHALEUR RAYONNANTE.

Les changements de température qu'éprouvent les corps prouvent qu'ils peuvent donner ou recevoir de la chaleur; cette communication du calorique se fait, soit à distance, soit au contact.

Conductibilité.—L'expérience de tous les jours démontre à l'évidence la transmission de la chaleur d'un point à un autre de la masse d'un même corps. Tout le monde sait que lorsqu'on met une barre de fer en contact, par une de ses extrémités, avec un foyer de chaleur un peu intense, l'autre extrémité s'échauffe rapidement, à tel point que la main ne peut bientôt plus la tenir. De plus, la sensation de chaleur éprouvée par la main prouve la communication de la chaleur du fer à la main elle-même. Cette propriété que possèdent des corps de transmettre ainsi la chaleur s'appelle *conductibilité* : *conductibilité intérieure*, tant que l'on considère la chaleur dans l'intérieur d'un même corps ; *conductibilité extérieure*, quand on considère son passage d'un corps à un autre.

On sait aussi que tous les corps sont loin d'être doués au même point de la conductibilité; que, tandis que la barre de fer dont nous parlions tout à l'heure s'échauffe rapidement d'une extrémité à l'autre, un tube de verre peut être amené en un de ses points à une température assez élevée pour qu'il se ramollisse, sans que pour cela les doigts qui tiennent le verre, à 2 ou 3 centimètres de la partie échauffée au rouge, éprouvent de sensation de chaleur bien marquée. Voici à peu près l'ordre dans lequel les physiciens rangent les corps solides relativement à la conductibilité intérieure : or, platine, argent, cuivre, fer, zinc, étain, plomb, marbre, cristal de roche, verre, porcelaine, poterie, bois, etc.

Les liquides sont généralement très-mauvais conducteurs, sauf le mercure qui fait exception par sa nature métallique. Leur échauffement rapide, quand le foyer agit sur la partie inférieure du vase qui les renferme, est surtout dû aux mouvements qui s'opèrent dans la masse par suite des changements

de densité qu'amène l'action de la chaleur. Nous en avons déjà dit quelques mots à propos du maximum de densité de l'eau. Si on les chauffait par la partie supérieure, ces mouvements ne pourraient plus avoir lieu, et dès lors la communication de la chaleur serait très-lente.

Il en est de même pour les gaz; cependant ils s'échauffent plus facilement encore peut-être que les liquides, d'abord parce que la mobilité de leurs parties est plus grande, et ensuite parce que la chaleur amène dans la masse, indépendamment des changements de densité, des différences d'élasticité qui hâtent le mélange. Mais si l'on emprisonne la masse gazeuse dans des espaces étroits qui, en multipliant les frottements, rendent les mouvements difficiles, alors la communication de la chaleur est à peu près nulle. C'est ce qui explique l'emploi des vêtements pour préserver le corps des changements de température de l'air extérieur, et le maintenir dans un état à peu près constant.

Rayonnement. — La transmission de la chaleur à distance n'est pas aussi évidente que la transmission par contact; nous voyons bien un thermomètre, placé à 1 mètre d'un foyer de chaleur, monter de plusieurs degrés, mais on pourrait objecter que l'air qui sépare le foyer de l'instrument sert de véhicule à la chaleur. Une expérience directe de Rumford va nous prouver que la chaleur se transmet même à travers le vide.

On prend un ballon de verre dont le col ait environ 80 centimètres de longueur; on soude au fond la tige d'un petit thermomètre, de telle sorte que le réservoir occupe à peu près le centre du ballon; on remplit alors le ballon et le col de mercure, comme si l'on voulait faire un baromètre, et l'on plonge l'extrémité du tube dans un verre plein de mercure; le vide le plus parfait que l'on connaisse se trouve ainsi fait dans le ballon. Si l'on présente alors un boulet chauffé au rouge à 1 mètre de l'appareil ainsi établi, on voit le thermomètre monter *instantanément*. Cette instantanéité prouve bien que le verre du ballon et de la tige du thermomètre, dont la conductibilité est si faible, n'a été pour rien dans la transmission de la chaleur, et que cette chaleur a traversé l'espace vide qui sépare le mercure des parois.

Cette propagation de la chaleur se fait en ligne droite et dans toutes les directions autour du corps chaud. Pour le démontrer, on prend deux écrans en carton, percés chacun d'un trou de 1 centimètre de diamètre; on tend une corde passant

par les deux trous, de manière à fixer la position de deux points A et B situés sur la droite qui passe par ces deux trous, l'un à la droite des deux écrans, l'autre à la gauche. Si l'on place alors un thermomètre en A et ensuite un corps chaud en B, on voit le thermomètre monter instantanément; si l'on refait l'expérience en plaçant le thermomètre en dehors de la ligne AB, le mercure reste stationnaire.

On a donné alors le nom de *rayonnement* à ce mode de transmission de la chaleur, et l'on a appelé *rayon* la route rectiligne que suit la chaleur pour aller d'un centre calorique à un point donné de l'espace; seulement il est bien évident que quand nous parlons des propriétés calorifiques des rayons, nous ne les appliquons pas au rayon ainsi défini géométriquement, mais à la chaleur qui se transmet suivant sa direction.

Si nous supposons un corps chaud placé au centre d'une sphère creuse de 1 mètre de rayon, sa surface S recevra, dans l'unité de temps, une certaine somme de chaleur Q, et chaque unité de surface étant dans les mêmes conditions par rapport au corps chaud, recevra la quantité de chaleur $\frac{Q}{S}$. Supposons maintenant que la sphère ait un rayon double : sa surface deviendra, comme on le sait, 4 fois plus grande ou 4S; la somme de chaleur reçue dans chaque unité de temps sera pourtant toujours Q. Chaque unité de surface ne recevra donc plus que $\frac{Q}{4S}$, ou une quantité de chaleur 4 fois plus petite. C'est ce qu'exprime cette loi importante : la quantité de chaleur reçue normalement par une même étendue de surface placée à différentes distances d'une même source de chaleur, est en raison inverse du carré de la distance.

L'expérience montre en outre que, à distance égale, la quantité de chaleur reçue varierait avec l'obliquité des rayons sur la surface, et qu'elle serait d'autant moindre que l'incidence serait plus oblique.

Appareils thermoscopiques. — Pour comparer entre elles les intensités des faisceaux de rayons calorifiques, on fait usage d'instruments appelés *thermoscopes* ou *thermomètres différentiels*. Il en existe de plusieurs espèces; nous nous bornerons à décrire le plus simple, le thermomètre différentiel de Leslie, et nous renverrons aux traités de physique plus complets pour connaître le thermoscope ou *thermo-multiplicateur* de Melloni, appareil préférable de beaucoup à celui de Leslie,

mais dont le principe est plus difficile à comprendre, et qui repose sur l'emploi des courants électriques, dont nous n'avons point encore fait l'étude.

Avant de décrire cet instrument et l'usage que l'on en peut faire pour la mesure des quantités de chaleur, posons d'abord quelques définitions indispensables.

Vitesse de refroidissement. Loi de Newton. — Si, dans une enceinte assez vaste pour qu'on puisse admettre que, dans un temps donné, sa température ne changera pas sensiblement, on introduit un thermomètre chauffé à l'avance à une température notablement supérieure à celle de l'enceinte, on constate, en observant sa marche descendante, que sa température ne s'abaisse pas d'une manière uniforme, c'est-à-dire que pour des intervalles de temps égaux, successifs, elle ne descend pas du même nombre de degrés; en un mot, sa *vitesse de refroidissement* est variable. Pour se faire une idée nette de la vitesse de refroidissement, à un moment donné, il faut alors, procédant à peu près comme nous l'avons fait quand il s'agissait de la vitesse acquise dans le mouvement varié, supposer qu'une cause extérieure quelconque vienne, à partir du moment en question, restituer au corps la chaleur au fur et à mesure qu'il la perd. De cette manière, sa température se maintiendra constante en présence de l'enceinte, aussi à température constante. Dès lors il perdra, dans chaque unité de temps, la même quantité de chaleur, et cette quantité de chaleur perdue mesurera sa vitesse de refroidissement en ce moment.

Or, Newton a établi, sans le démontrer, il est vrai, que, dans ces conditions, les quantités de chaleur que perd un même corps sont proportionnelles à l'excès de sa température sur celle du milieu ambiant. L'expérience n'a pas complétement vérifié cette loi; elle a seulement montré qu'on pouvait la considérer comme suffisamment exacte, quand l'excès de température ne dépassait pas une vingtaine de degrés. —Dans ces limites, nous serons en droit de recourir à cette loi pour la mesure des quantités de chaleur.

Thermomètre différentiel. — Le thermomètre différentiel (fig. 112) se compose d'un tube calibré, recourbé deux fois à angle droit, présentant ainsi deux branches verticales d'égale longueur et une branche horizontale plus courte. Au sommet des branches verticales sont soufflées deux boules d'égal diamètre. Le tube contient une colonne d'acide sulfurique (huile de vitriol), coloré en rouge. Cette colonne occupe toute la bran-

che horizontale et à peu près moitié des tiges verticales. Par un balancement analogue à celui qu'on fait subir au tube de Mariote, on fait en sorte que les niveaux soient sur un même plan horizontal. On marque alors zéro au point commun d'affleurement, ce qui indique, non point la température zéro, mais une différence de température nulle entre les deux boules. On enveloppe alors l'une des deux boules de glace, et l'on chauffe l'autre à 10°. L'air, en s'échauffant dans cette boule, refoule le liquide qui baisse de ce côté et monte de l'autre de la même quantité, le tube étant partout d'égal diamètre On marque 10 au point d'affleurement et l'on divise l'intervalle de 0 à 10 en 10 parties égales; puis l'on poursuit la division au delà. L'instrument est dès lors propre à mesurer des différences de température. En effet, les boules ayant un diamètre beaucoup plus grand que celui des tubes, les déplacements du niveau liquide ne produisent pas de changements sensibles dans le volume des deux masses d'air égales. — Dès lors il n'y a, par le fait du changement de température, que les élasticités qui changent. Or, nous avons dit que la force élastique d'une masse d'air dont le volume est invariable croît comme croîtrait le volume si la dilatation était libre; il en résulte que l'accroissement de la force élastique est proportionnel à l'accroissement de la température, ou bien que les différences des forces élastiques de deux masses d'air égales, renfermées sous des volumes invariables, sont proportionnelles à leurs différences de température. Mais les différences de force élastique sont mesurées sur l'instrument par les différences de niveau; donc aussi ces différences de niveau mesurent les différences de température des boules.

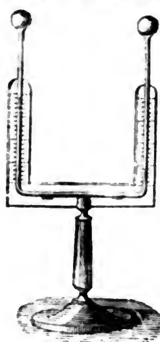


Fig. 112.

Voici maintenant comment on peut, à l'aide de cet instrument, comparer entre elles les intensités. On soumet l'une des boules à l'action d'une source constante de chaleur, ayant soin de préserver l'autre boule par un écran, de manière qu'elle garde la température du milieu ambiant. Comme la boule n'offre qu'une très-petite surface, et ne peut recevoir qu'un faisceau calorifique de petite étendue, on la place au foyer d'un miroir concave réflecteur, de manière à concentrer sur la boule tout le faisceau qui tombe sur la surface de ce miroir (nous verrons, en effet, tout

à l'heure, que la chaleur se réfléchit comme la lumière et suivant les mêmes lois). Dans ces conditions, la boule qui reçoit ces rayons, et que nous appellerons, pour abréger, la *boule focale*, s'échauffe progressivement, ce qu'atteste le déplacement graduel des niveaux. Au fur et à mesure qu'elle s'échauffe, elle perd de la chaleur par le rayonnement vers le milieu ambiant; et elle en perd d'autant plus que l'excès de sa température sur celle de ce milieu est plus considérable; tandis que la quantité de chaleur qu'elle reçoit du foyer est toujours la même. Il doit alors nécessairement arriver un moment où il y aura égalité entre la quantité de chaleur gagnée et la quantité de chaleur perdue dans le même temps, et ce qui mesurera l'une mesurera aussi l'autre. Mais lorsqu'on sera arrivé à ce moment où la différence de température des boules est devenue fixe, et où par conséquent les niveaux sont stationnaires, on se trouve justement dans les conditions où le principe de Newton est applicable; car la vitesse de refroidissement est devenue constante, et l'on peut toujours faire en sorte, par un éloignement convenable de la source au thermoscope, que la différence de température soit dans les limites voulues. Dès lors la quantité de chaleur perdue dans l'unité de temps par la boule focale est proportionnelle à l'excès de sa température sur celle du milieu ambiant, ou à la différence de température des deux boules, mesurée par l'instrument. Donc aussi la quantité de chaleur apportée par le faisceau calorifique dans l'unité de temps, quantité qui mesure évidemment son intensité, est proportionnelle à la différence des niveaux indiquée par le thermoscope.

Nous sommes donc en mesure actuellement de constater et de comparer les effets produits par le rayonnement.

Nous pouvons envisager la chaleur rayonnée à deux points de vue : par rapport au corps qui l'envoie, et par rapport au corps qui la reçoit.

Pouvoirs rayonnants. — Il s'en faut de beaucoup que tous les corps pris à une même température fixe agissent de la même manière, dans les mêmes circonstances, sur le thermoscope. Il est facile de se convaincre, à l'aide de cet instrument, que les corps émettent dans le même temps des quantités de chaleur très-différentes, ce que l'on exprime en disant qu'ils ont des *pouvoirs rayonnants* plus ou moins grands.

En prenant pour unité l'intensité du faisceau calorifique envoyé par l'un de ces corps vers le thermoscope, dans certaines conditions données de température et de position, nous lui

comparerons les intensités des faisceaux envoyés par les autres corps placés dans des conditions identiques et les nombres qui mesureront les rapports de ces intensités exprimeront par cela même les *pouvoirs rayonnants relatifs*, au moins pour les circonstances de température de l'expérience, car il peut se faire que les rapports ne soient pas les mêmes pour toute température.

Ceci compris, voici comment on dispose les choses pour procéder à cette mesure : On prend pour source de chaleur un cube A, creux, dont les quatre faces latérales sont formées de quatre substances solides différentes, par exemple, fer-blanc, cuivre, argent, zinc (fig. 113). Le cube est rempli d'eau et porte un thermomètre *a*. Il est disposé sur un support cylindrique B, dans l'intérieur duquel est logée une lampe à alcool C, destinée

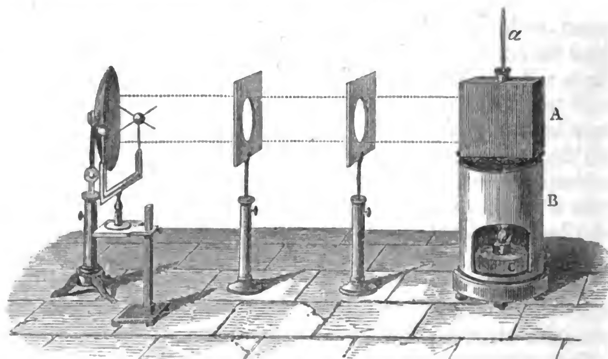


Fig. 113.

à maintenir l'eau à l'ébullition. On a donc ainsi quatre lames métalliques, d'égale surface, à égale température. On tourne l'une des faces vers le miroir réflecteur de l'appareil décrit plus haut, de telle sorte que la droite qui va du centre de la face au milieu du miroir soit perpendiculaire à la face et passe par le foyer du miroir. On peut limiter l'étendue du faisceau calorifique au moyen de deux écrans, percés de trous d'égal diamètre, de manière à avoir un faisceau de rayons parallèles. La boule focale du thermomètre différentiel est recouverte de noir de fumée, pour que la chaleur qu'elle reçoit du miroir par réflexion ne la traverse pas sans l'échauffer, et on la place au foyer de ce miroir. Un écran opaque préserve la seconde boule de tout rayonnement calorifique venant de l'appareil. On attend

que le thermomètre différentiel soit devenu stationnaire, et l'on note son indication; on fait alors tourner le cube de manière à substituer la seconde face à la première, et l'on recommence l'expérience dans ces conditions; puis on substitue la 3[e] face; puis la 4[e]. Les nombres obtenus donnent, comme nous l'avons dit plus haut, les pouvoirs rayonnants relatifs. — On peut maintenant appliquer sur les faces du cube des lames d'autres substances, ou des couches de noir de fumée, de vernis, de corps gras, etc., et l'on aura ainsi facilement les pouvoirs rayonnants des corps. Il est vrai qu'on peut se demander si une plaque de fer-blanc, recouverte de noir de fumée, rayonne comme une plaque de noir de fumée tout seul. Mais Leslie, à qui l'on doit cette méthode expérimentale, s'est assuré par l'expérience que lorsque la couche superposée atteint une certaine épaisseur, toujours très-petite, l'indication du thermoscope demeure ensuite invariable, quel que soit l'accroissement donné à cette épaisseur, quelle que soit aussi la nature de la substance sur laquelle est appliquée la couche; il en résulte que le pouvoir rayonnant ne dépend que de l'état de la couche superficielle et que par conséquent une plaque de fer-blanc recouverte d'une couche suffisamment épaisse de noir de fumée ou de vernis, donne le pouvoir rayonnant du noir de fumée ou du vernis. Le noir de fumée est de tous les corps celui qui a le pouvoir rayonnant le plus grand. Si on le représente par 100, les autres pouvoirs seront mesurés par les nombres suivants :

Noir de fumée	100
Céruse (carbonate de plomb)	100
Papier	98
Verre	90
Encre de Chine	85
Feuille d'argent sur verre	27
Fonte et fer en moyenne	24
Acier poli / Platine en lames / Métal des miroirs	17
Étain, cuivre verni	14
Laiton fondu	11
Laiton battu poli	7
Cuivre rouge non verni	7
Or plaqué	5
Or sur acier poli / Argent battu poli	3

On voit sur le tableau quelle énorme différence il y a entre le pouvoir rayonnant des métaux et celui des corps non métalliques. On peut aussi remarquer l'influence qu'exerce pour les métaux l'état de la surface; pour les métaux qui ont subi des actions mécaniques telles que le battage, le laminage, le pouvoir rayonnant augmente quand la surface est striée; le contraire a généralement lieu pour les métaux fondus. Quant aux corps non métalliques, marbre, pierre, qui ne sont point susceptibles de s'écrouer par la pression, c'est-à-dire d'éprouver comme les métaux un tassement dans les couches superficielles, ce poli, plus ou moins grand de la surface, n'a pas d'influence sensible.

Leslie avait cru remarquer que les corps de couleur sombre ont un pouvoir rayonnant plus grand que les autres; mais nous voyons par la comparaison du noir de fumée et du blanc de plomb, du papier et de l'encre de Chine, que cela est loin d'être toujours vrai.

Les nombres que nous avons donnés ne sont pas tout à fait ceux de Leslie; ils ont été corrigés par les expériences plus exactes de M. Melloni, et de MM. Laprovostaye et Desains.

Réflexion.—Diffusion. — Transmission. — Absorption. — Si nous prenons maintenant le faisceau qui tombe sur un corps, nous trouverons qu'il se partage ordinairement en deux portions, l'une qui franchit la surface du corps pour pénétrer dans sa masse; l'autre, au contraire, qui reste en deçà de cette surface et se trouve renvoyée dans l'espace.

Sur la première portion du faisceau une certaine fraction traverse le corps sans s'y arrêter, comme la lumière traverse le verre ou l'eau; elle est *transmise* par transparence; la fraction complémentaire reste *absorbée* par la masse du corps.

Sur la seconde portion du faisceau une certaine fraction est renvoyée dans une direction déterminée comme la direction d'incidence, et nous donnerons plus loin la loi géométrique qui lie l'une à l'autre ces deux directions; c'est ce qu'on appelle la *réflexion* régulière; la fraction complémentaire, presque toujours extrêmement petite, est disséminée dans tous les sens par une espèce de réflexion irrégulière appelée *diffusion*, analogue à celle qui se manifeste à l'incidence de la lumière sur les corps et qui, comme nous le verrons plus tard, est précisément ce qui nous les rend visibles.

Ainsi la chaleur en tombant sur un corps peut être réfléchie régulièrement, diffusée, absorbée ou transmise.

Si l'on suppose que l'on compare l'intensité de chacun des faisceaux réfléchi, transmis, absorbé, diffusé, à celle du faisceau incident, le nombre qui exprimera ce rapport sera la mesure de ce que l'on appelle le pouvoir *réflecteur*, *transparent*, ou plutôt *diathermane*, *absorbant*, et *diffusif*.

Nous pouvons, toujours au moyen du thermoscope différentiel de Leslie, démontrer l'existence de ces quatre pouvoirs.

Si l'on fait tomber sur une plaque de métal poli un faisceau de rayons calorifiques parallèles, venant d'une source de chaleur suffisamment intense, comme un boulet chauffé au rouge (fig. 114), on verra que, quelle que soit la direction du faisceau incident par rapport à la plaque, il existe toujours une certaine direction BC telle que si l'on place la boule noircie du thermo-

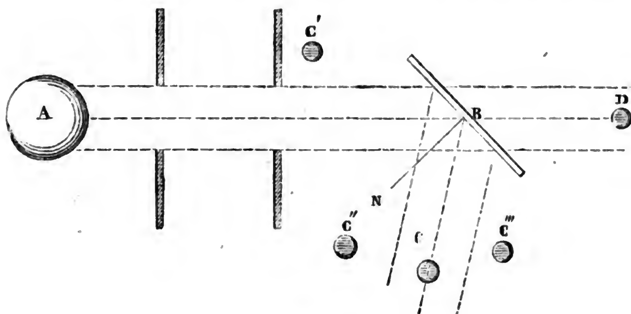


Fig. 114.

mètre différentiel sur cette direction, cette boule éprouvera un échauffement notable, tandis que dans toute autre position C', C'' ou C''', les niveaux restent sensiblement stationnaires. Il est facile de comparer l'une à l'autre ces deux directions AB et BC, et l'on trouve qu'elles sont soumises à la loi suivante, qui est aussi celle de la réflexion de la lumière :

Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante ; de plus l'angle formé par le rayon incident AB avec la perpendiculaire à la surface BN, ou angle d'incidence, est égal à l'angle formé par le rayon réfléchi BC avec cette même perpendiculaire, ou angle de réflexion.

Il est d'ailleurs un mode indirect de démonstration qui donne des résultats très-frappants. Nous démontrerons plus tard, en

nous appuyant sur les lois de la réflexion de la lumière, que si on dispose en face l'un de l'autre deux miroirs sphériques concaves, de telle sorte que la droite qui joint les centres des sphères dont ces miroirs sont censés faire partie, passe en même temps par les points milieux de leurs surfaces (fig. 115); si de plus on place au point *b*, milieu du rayon de l'un des miroirs, un corps lumineux, les rayons émanant de *b* seront rendus, par la réflexion sur le miroir, parallèles à la ligne des centres et, tombant sur le second miroir, iront, par le fait de cette

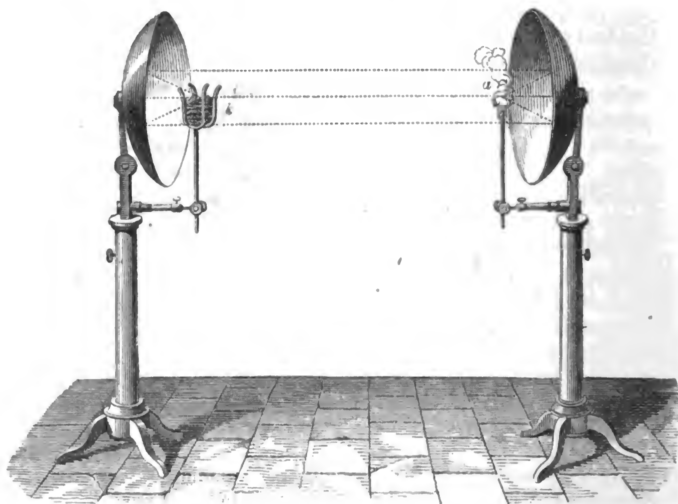


Fig. 115.

seconde réflexion, se croiser tous au point *a*, milieu du rayon du second miroir; de telle sorte que si l'on place en *a* un petit écran de carton, il sera très-vivement éclairé.

Dès l'instant où les lois de la réflexion calorifique sont les mêmes que celles de la réflexion lumineuse, en plaçant en *b* un corps chaud, comme un boulet chauffé au rouge, le point *a* devra recevoir tous les rayons réfléchis. Aussi voit-on les corps combustibles, tels que, amadou, coton-poudre, que l'on place en *a*, s'y enflammer rapidement. On remarque en outre que les miroirs eux-mêmes s'échauffent à peine. Cette expérience est con-

nue sous le nom d'expérience des miroirs d'Archimède. Elle rappelle un fait bien connu de l'histoire de ce savant géomètre.

Le pouvoir absorbant des corps est démontré par ce seul fait qu'ils s'échauffent en présence d'une source de chaleur, nous n'avons donc point à prouver son existence.

Il n'en est pas de même du pouvoir diathermane. La transparence des corps pour la chaleur a été longtemps contestée; mais depuis les expériences de Prévôt de Genève, de Delaroche, et surtout de Melloni, l'existence de la diathermanéité n'est plus mise en doute. Ce n'est pas cependant qu'on niât qu'un thermomètre séparé d'un foyer de chaleur par une plaque de verre ou une couche d'eau pût s'échauffer; c'eût été aller trop évidemment contre l'expérience de tous les jours. Mais on admettait que cet échauffement était dû, d'abord à l'absorption de chaleur par le corps interposé, puis au rayonnement de ce même corps, par sa face postérieure, vers le thermomètre. A la vérité l'instantanéité de l'ascension du thermomètre aurait dû déjà faire écarter ce mode de transmission si complexe, surtout quand on considère que le verre et l'eau sont des corps très-mauvais conducteurs. Nous allons donner quelques-unes des expériences par lesquelles les physiciens dont nous avons cité les noms ont établi nettement la transparence des corps pour la chaleur comme pour la lumière.

En laissant écouler par une fente horizontale l'eau contenue dans un bassin, on peut obtenir une nappe d'eau d'une certaine épaisseur et qui, se renouvelant constamment devant un foyer de chaleur, n'a évidemment pas le temps, ni de contracter d'échauffement sensible, ni par conséquent de rayonner de chaleur. Or, un thermomètre placé de l'autre côté de la nappe monte instantanément comme si la nappe était immobile.

En second lieu, s'il était vrai que l'absorption et le rayonnement par le corps interposé fussent pour quelque chose dans l'effet produit sur le thermomètre, tout ce qui tendrait à augmenter le pouvoir absorbant et le pouvoir rayonnant de ce corps devrait par cela même augmenter l'effet produit. Or, l'expérience prouve tout le contraire. Le noir de fumée est, comme nous l'avons dit, le corps qui a le plus grand pouvoir rayonnant; c'est en même temps, nous le montrerons tout à l'heure, celui qui a le plus grand pouvoir absorbant; et cependant si, en exposant une plaque de verre à la fumée d'une lampe, on la recouvre d'une couche de noir, on trouve que, dans ces condi-

tions, cette plaque, mise devant un foyer de chaleur, est sans action sensible sur le thermomètre placé derrière, tandis qu'avant d'être recouverte de noir elle agissait sur lui immédiatement.

Il faut remarquer que le verre nu ne laisse passer en quantité sensible que les rayons de chaleur qui viennent d'une source de chaleur avec flamme, ou tout au moins d'un corps incandescent. Car si l'on faisait l'expérience avec le cube de Leslie ou une plaque de métal chauffée à 300° ou 400°, on n'obtiendrait aucun résultat.

Ce fait se rattache à une observation générale que nous ferons plus loin ; mais pris même isolément, il va nous servir à démontrer l'existence du pouvoir diffusif.

Faisons tomber sur une plaque de métal non poli, ou mieux encore, sur une plaque de cuivre, recouverte par la galvanoplastie d'une couche d'argent un peu rugueuse, un faisceau de rayons calorifiques venus d'une lampe ou d'un foyer quelconque de chaleur *lumineuse*. La plaque étant présentée normalement au faisceau, la direction de la réflexion régulière se confond avec la direction d'incidence. Si, dans ces conditions, on présente le thermoscope (soit le thermomètre différentiel, soit l'appareil plus délicat de Melloni) à la face antérieure de la plaque, et en dehors bien entendu de la direction du faisceau lui-même, l'instrument indique une élévation de température. Il y a donc de la chaleur envoyée par cette face dans une direction autre que celle de la réflexion régulière ; il est vrai qu'on pourrait reproduire ici l'objection faite pour la chaleur diathermane, et dire que la plaque a d'abord absorbé de la chaleur pour la rayonner ensuite. Mais il faut remarquer que, s'il en était ainsi, cette chaleur ne sortirait plus d'un corps incandescent, qu'elle serait alors dans des conditions telles, que le verre ne la laisserait point passer ; et pourtant, si l'on place une lame de verre entre la plaque de métal et le thermoscope, celui-ci monte encore à peu près autant qu'auparavant. Cette chaleur a donc été renvoyée par la face antérieure, telle que la source l'envoyait, et sans pénétrer dans le corps.

Telles sont les quatre modifications que la chaleur éprouve au contact des corps. Nous allons maintenant donner rapidement une idée des moyens employés pour mesurer les pouvoirs diathermanes, réflecteurs, diffusifs et absorbants.

Pouvoir diathermane. — Pour mesurer le pouvoir diathermane, il suffira de faire tomber directement sur l'instrument

thermoscopique le faisceau venant de la source et de noter l'indication du thermomètre différentiel, puis d'interposer le corps diathermane et de noter la nouvelle indication. Si l'on a eu le soin de placer la source à une assez grande distance la différence de température des boules ne dépasse pas la limite voulue pour que la loi de Newton soit applicable, et le rapport de la seconde indication à la première mesurera le rapport du faisceau transmis au faisceau incident.

En procédant ainsi, M. Melloni a reconnu :

1° Que la transparence des corps pour la chaleur varie avec l'état de la surface, qu'elle est d'autant plus grande que le poli est plus parfait.

2° Que l'intensité du faisceau transmis diminue à mesure que l'épaisseur du corps interposé augmente; mais la quantité de chaleur retenue par le corps n'est pas proportionnelle à son épaisseur; la chaleur traverse d'autant plus facilement un corps qu'elle a déjà traversé une épaisseur plus grande de ce même corps; — à ce point qu'au delà d'une certaine épaisseur, très-petite en général pour les corps cristallisés, la déperdition n'augmente plus.

3° En exposant au même faisceau calorifique des plaques de même épaisseur, de substances différentes, on a reconnu que le rapport du faisceau transmis au faisceau incident, rapport qui est ici le *pouvoir diathermane*, les corps étant pris tous dans les mêmes conditions, varie avec la nature de ces substances. L'ordre de diathermanéité est loin d'être le même que celui de la transparence lumineuse; ainsi le cristal de roche noir, appelé par les minéralogistes *quarz enfumé*, est beaucoup plus transparent pour la chaleur que l'alun le plus limpide, L'acide sulfurique de Saxe, le plus coloré, est plus transparent pour la chaleur que l'eau, l'alcool, etc.

4° La chaleur, suivant qu'elle émane d'une lampe, d'un corps incandescent, d'une plaque de métal, du cube de Leslie, n'est pas également transmissible par un même corps; ainsi, en plaçant successivement ces quatre sources de chaleur à des distances du thermoscope telles, que chacune d'elles, agissant directement sur l'instrument, donne à ses niveaux le même déplacement, on aura quatre faisceaux d'égale intensité, mais non de même nature, car une plaque d'alun se montrera plus diathermane pour la chaleur venue de la première source que pour la chaleur venue de la seconde, plus pour celle-ci que pour la chaleur venue de la troisième, et plus enfin pour cette dernière que pour la chaleur venue du cube; il en est de même pour

presque tous les corps [1]. Le sel gemme paraît cependant également diathermane pour les quatre faisceaux. La tourmaline, le sel gemme noirci par la fumée, le verre vert sont, au contraire, d'après M. Melloni, plus transparents pour la chaleur venue des sources à basse température.

La conclusion c'est que la chaleur qui émane d'une source n'est pas homogène, et qu'elle est, comme la lumière, composée de rayons de différentes natures, inégalement absorbables par les corps. — On appelle *thermochroïsme* cette espèce de coloration des corps pour la chaleur, analogue à celle qu'ils présentent pour la lumière, et qui sera mieux comprise encore quand nous exposerons à la fin de ce volume les phénomènes optiques auxquels ceux-ci sont parallèles.

Pouvoir réflecteur. — Pour mesurer les pouvoirs réflecteurs relatifs des différents corps, voici la méthode suivie par Leslie. Reprenons la disposition d'appareil employée pour la mesure des pouvoirs rayonnants; seulement entre le miroir et son foyer F, plaçons un petit miroir plan *ab* qui renvoie les rayons se croiser en *o* (fig. 116). C'est en ce point *o* que nous placerons la boule focale du thermomètre différentiel, le faisceau calorifique qui tombe sur le miroir *ab* reste le même pendant toute la durée de l'expérience; conséquemment, si l'on change la nature de ce miroir sans changer sa position, la quantité de chaleur qu'il enverra dans l'unité de temps au point *o*, sera proportionnelle à son pouvoir réflecteur.

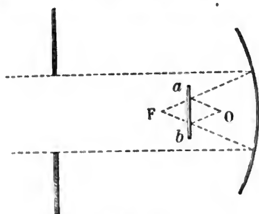


Fig. 116.

Cette méthode ne donne que les rapports des pouvoirs réflecteurs des différents corps mis successivement dans la position *ab*; elle ne donne pas la valeur même du pouvoir réflecteur pour chacun d'eux, c'est-à-dire le rapport entre l'intensité du faisceau réfléchi et l'intensité du faisceau incident. — Enfin ce faisceau incident se compose de rayons qui tombent sur la plaque sous des incidences très-diverses, ce qui rend le résultat complexe.

1. Cette propriété que nous avons signalée dans le verre explique pourquoi la chaleur solaire pénètre si facilement dans une enveloppe de verre, et n'en sort ensuite que lentement; elle rend compte de l'utilité des cloches à melons, des serres vitrées, etc.

Il est plus logique de procéder de la manière suivante : placer l'instrument thermoscopique en D (fig. 114) sur le passage du faisceau direct venant de la source de chaleur, et prendre son indication quand les niveaux sont devenus stationnaires, puis interposer en B une plaque du corps dont on veut déterminer le pouvoir réflecteur; sur la direction du faisceau réfléchi placer en C, à la distance BC=BD le même appareil thermoscopique et prendre le rapport de la seconde indication de l'instrument à la première. Une fois qu'on a par là le pouvoir réflecteur pour un corps, on peut ensuite procéder par comparaison pour les autres, en se bornant à changer la nature de la plaque B, sans changer sa position. On n'a plus besoin de ramener le thermoscope en D, si la source est constante. Il est cependant bon de le faire de temps en temps, précisément pour s'assurer de cette constance de la source.

On pourra d'ailleurs varier à volonté l'inclinaison de la plaque pour reconnaître si cette variation d'inclinaison fait changer le pouvoir réflecteur.

Cette méthode appliquée d'abord par Melloni, puis par MM. Laprovostaye et Desains, a donné pour les métaux polis les nombres suivants (le faisceau incident est supposé égal à 100).

	Pouv. réflect.	Pouv. rayonn.
Plaqué d'argent.......	97...........	3
Cuivre rouge..........	93...........	7
Laiton	93...........	7
Acier	82,5.........	17
Zinc	81...........	»
Fer...................	76...........	24

Nous avons mis en regard des pouvoirs réflecteurs les nombres qui représentent les pouvoirs rayonnants, et voici pourquoi : les corps que nous venons de citer n'ont ni pouvoir diathermane, ni pouvoir diffusif quand ils sont polis. Pour ces corps le pouvoir absorbant est donc complémentaire du pouvoir réflecteur. Or, il se trouve qu'en supposant le faisceau incident égal à 100 le pouvoir réflecteur est complémentaire aussi du pouvoir rayonnant; c'est donc établir par cela même, pour ces corps, l'égalité du pouvoir rayonnant et du pouvoir absorbant. La quantité de chaleur réfléchie varie d'ailleurs avec l'incidence; pour les métaux elle reste sensiblement constante depuis l'incidence perpendiculaire jusqu'à un angle de 70° avec la

normale ; au delà elle va en décroissant, contrairement à ce qui arrive pour la réflexion lumineuse, contrairement même à ce qui arrive pour la réflexion calorifique avec le verre.

Enfin, d'après les expériences de MM. Laprovostaye et Desains, les métaux, et surtout le laiton, réfléchiraient en plus forte proportion la chaleur venant des sources à basse température.

Pouvoir absorbant. — Leslie a tenté de mesurer les pouvoirs absorbants relatifs, mais par une méthode qui est évidemment vicieuse. Employant l'appareil qui lui avait servi à mesurer les pouvoirs rayonnants, il se contentait de couvrir la boule focale de son thermomètre différentiel d'une couche ou d'une feuille du corps dont il voulait avoir le pouvoir absorbant : et il regardait dans ses expériences successives, les indications du thermoscope comme proportionnelles aux pouvoirs absorbants des corps qui enveloppaient la boule. Mais il y a ici une application fausse du principe de Newton. La loi de Newton s'applique en effet aux quantités de chaleur qu'émet un *même corps* placé successivement dans des conditions variables par rapport au milieu ambiant, mais non point à des corps différents.

Il n'y a pas de méthode directe pour mesurer les pouvoirs absorbants ; mais Dulong ayant constaté qu'un thermomètre placé à 10° dans une enceinte vide à 0°, met le même temps à se refroidir qu'il met à s'échauffer lorsqu'il est placé à 0° dans l'enceinte vide à 10°, en a conclu l'égalité des pouvoirs absorbants et rayonnants, égalité déjà indiquée par les nombres que nous avons donnés plus haut à propos du pouvoir réflecteur, et que nous admettrons comme démontrée, quoique cependant l'expérience ait fait voir qu'elle ne se soutient pas à toute température.

Pouvoir diffusif. — Ainsi nous savons mesurer le pouvoir diathermane, le pouvoir réflecteur, le pouvoir absorbant, en prenant pour sa valeur celle du pouvoir rayonnant; il ne nous reste plus que le pouvoir diffusif, pour lequel on n'a pas de méthode directe, mais dont on peut avoir la valeur puisqu'il est évidemment complémentaire de la somme des trois autres pouvoirs.

Équilibre mobile de température. — Nous avons dit, en posant les définitions relatives à la température, que si l'on plaçait en présence les uns des autres des corps pris au hasard dans des conditions de température quelconques, les uns s'échauffent, les autres se refroidissent, jusqu'à ce qu'il arrive un

moment où leurs états de chaleur demeureront fixes, et nous avons dit que nous les considérions alors comme étant à la même température. Une fois que cette égalité de température est établie, il n'y a pas de raison pour admettre que des corps qui rayonnaient auparavant ne rayonnent plus maintenant ; il est plus simple et plus logique d'admettre que tous rayonnent encore, et que chacun d'eux perd, par le rayonnement dans l'unité de temps, juste autant de chaleur qu'il en reçoit, dans le même temps, des autres corps. Ce principe renferme, comme cas particulier, ceux que nous avons mis en avant pour expliquer l'emploi du thermomètre différentiel; il est connu dans la science sous le nom de principe de l'*équilibre mobile de température.*

Ainsi lorsqu'un corps à basse température est en présence d'un corps plus chaud que lui, il y a refroidissement pour ce dernier, non pas que l'autre lui envoie du froid,—cette expression, toute commune qu'elle soit, n'a pas de sens en physique, — mais ce refroidissement provient de ce que le corps froid rayonne moins de chaleur qu'il n'en reçoit; d'où il résulte qu'il doit s'échauffer ; tandis que le second corps perd, au contraire, plus de chaleur que l'autre ne lui en donne; il doit donc se refroidir jusqu'à ce qu'arrive le moment où l'égalité se rétablira pour chaque corps entre les quantités de chaleur gagnées et perdues, jusqu'à ce que l'équilibre mobile soit établi, et avec lui, l'égalité de température.

CHAPITRE XII.

CHANGEMENT D'ÉTAT DES CORPS.—CHALEUR LATENTE.

Fusion. — Lorsqu'on expose un morceau de plomb à l'action de la chaleur, il se dilate à mesure que la température s'élève ; puis, lorsque cette température est arrivée à 340° environ, le plomb se liquéfie. Ce phénomène, désigné en physique sous le nom de *fusion*, est général. Il n'y a d'exception que pour les corps composés, dont les éléments chimiques sont unis entre eux par une affinité assez faible pour que la chaleur détermine leur séparation avant d'amener le corps à son point de fusion. Ainsi, le bois se décompose sans se fondre; il en est de même pour la craie. Et cependant encore il est telle disposition d'expérience qui, en retardant cette décomposition, permet au corps de se conserver intact jusqu'à une température assez élevée pour que sa fusion ait lieu. C'est ainsi qu'en enfermant de la craie dans un canon de fusil hermétiquement bouché, le chevalier Hall est arrivé à la fondre et à la transformer en marbre. La craie est formée de deux principes : un corps solide, la chaux; un corps gazeux, l'acide carbonique. La chaleur les sépare l'un de l'autre, et met le gaz en liberté. Mais cependant si le gaz est soumis à une très-forte pression, il ne pourra pas se dégager. C'est précisément ce qui arrive dans l'expérience de Hall, les premières portions d'acide carbonique mises en liberté restent accumulées dans le canon qui est fermé ; elles exercent donc la pression nécessaire pour empêcher le reste du gaz de se dégager ; une partie de la masse demeurera alors à l'état de craie et pourra entrer en fusion.

Quant aux corps qui ne se décomposent point, et que cependant l'on n'a pas pu fondre, leur infusibilité est

toute relative. Ainsi, au commencement de ce siècle, les corps que l'on regardait comme infusibles, étaient très-nombreux : le platine, la silice, par exemple, résistaient à tous les moyens employés jusqu'alors pour amener les corps à l'état liquide. La pile de Volta et le chalumeau à oxygène et hydrogène ont permis de les liquéfier tous les deux. Dernièrement même, M. Deville, à l'aide d'un simple fourneau de forge convenablement alimenté d'air, est parvenu à fondre le platine. Tout se réduit donc pour les corps appelés réfractaires, à une question de moyens. Si la chaux, si la magnésie n'ont pu encore être liquéfiées, ce n'est point que ces corps soient réellement et essentiellement infusibles, c'est simplement parce que l'on n'a pas encore pu produire une chaleur suffisante pour déterminer leur fusion. Du jour au lendemain le procédé peut être trouvé, et ces corps ne seront plus réfractaires.

Lorsqu'un corps est pur, quel que soit le moyen que l'on emploie pour le fondre, la température de fusion est toujours la même ; ainsi le corps ne peut point, sous la forme solide, dépasser cette limite de température. La température de fusion varie avec la nature des corps. Ainsi la glace ou l'eau solide fond à zéro, le mercure solidifié par le froid fond à 40° au-dessous de zéro. Au surplus, nous réunissons ici sous forme de tableau les points de fusion des substances les plus connues.

Fer..........	1500°	Plomb...............	332
Acier.........	1350	Étain...............	228
Fonte........	1000 à 1200	Alliage d'Arcet........	94
Or pur.......	1250	Soufre...............	114
Or à $\frac{900}{1000}$.....	1180	Phosphore...........	44
Argent.......	1000	Acide stéarique........	70
Bronze.......	950	Cire.................	67
Zinc.........	423	Suif.................	33

Une circonstance plus importante encore à constater, et qui caractérise le phénomène de la fusion, c'est la constance de la température pendant toute la durée de la fusion. La portion encore solide et qui subit le change-

ment d'état, conserve invariablement cette température. Quant à la partie liquide, elle peut s'échauffer, au moins dans les points qui ne sont point en contact avec le corps solide. Ainsi si l'on enveloppe la boule d'un thermomètre d'une couche de cire, et si on plonge l'instrument dans de l'eau à 70°, on voit le thermomètre marquer 67° jusqu'à ce que toute la cire soit fondue. Ce fait est, au surplus, la conséquence naturelle du précédent ; la cire quittant l'état solide à 67°, il est évident que la masse solide ne peut pas dépasser cette température sans devenir liquide. Il resterait donc à expliquer ce que devient la chaleur que ne cesse pas de fournir le foyer, et quel rôle elle joue. C'est ce que nous ferons à la fin de ce chapitre, après avoir exposé l'ensemble des faits relatifs aux changements d'état.

Solidification. — Prenons maintenant le phénomène en sens inverse, et laissons refroidir la cire liquéfiée. En suivant la marche du thermomètre plongé dans le liquide, nous verrons la température s'abaisser jusqu'à 67° : en ce moment la masse se solidifiera *progressivement*, et le thermomètre demeurera à 67° jusqu'à ce que la portion qui l'enveloppe immédiatement soit devenue solide ; alors sa température s'abaissera au-dessous de 67°, et se mettra en équilibre avec celle des corps environnants. Nous voyons d'après cela que la température de solidification est la même que la température de fusion, et qu'elle jouit de ce même caractère de fixité que nous avons signalé et expliqué tout à l'heure. Il est certain aussi que malgré la fixité de la température le corps ne cesse pas de perdre de la chaleur, et l'explication de ce que devient cette chaleur, enlevée par la cause refroidissante, se lie évidemment avec celle que nous donnerons plus tard du rôle de la chaleur dans le phénomène de la fusion.

Le phénomène de la solidification des liquides a tout autant de généralité que celui de la fusion, et s'il y a des corps qui aient jusqu'à présent résisté à tous les moyens employés pour les solidifier, la faute en est à l'imperfection de ces moyens ; et quand on sera arrivé à produire

un froid aussi grand qu'on le voudra, on ne trouvera pas plus de corps réfractaires à la solidification, qu'on ne trouvera de corps réfractaires à la fusion quand on pourra les chauffer assez fortement. Remarquons bien que produire du froid n'est pas autre chose qu'enlever de la chaleur; le mot de froid n'exprime rien que de relatif.

Retard de la congélation. — Nous venons de dire tout à l'heure que la température de solidification pour une substance est la même que sa température de fusion. Il n'y a pas cependant la même constance dans la première température que dans la seconde. Lorsqu'un corps solide arrive à sa température de fusion, il devient *nécessairement* liquide; mais lorsque ce même corps liquéfié est ramené à cette température, il peut ne pas devenir solide, et descendre à une température notablement plus basse, en conservant l'état liquide, si l'on a soin de le maintenir dans une immobilité complète. Farenheit l'a constaté pour l'eau; le fait a été depuis vérifié et étudié avec soin par M. Despretz; et M. Person a reconnu que beaucoup d'autres corps étaient dans le même cas.

Si l'on place de l'eau dans un vase en la recouvrant d'une couche d'huile pour préserver sa surface de toute agitation, si on la laisse ensuite se refroidir lentement en évitant toutes les causes qui pourraient déterminer dans la masse le moindre mouvement, on peut l'amener à 10° et même à 12° au-dessous de zéro. Alors elle se congèle non point en totalité, mais seulement en partie, et la masse tout entière, solide et liquide, remonte instantanément à zéro ; ce qui prouve bien que c'est grâce à l'immobilité du liquide que la température peut ainsi descendre et la masse rester sous cet état, que M. Person appelle *surfusion*, c'est que si, pendant la période du refroidissement au-dessous de zéro, on vient à ébranler le liquide, soit en l'agitant avec un morceau de verre, soit même simplement en frappant dans ses mains ou sur la peau d'un tambour à côté du vase, on voit la solidification partielle se produire aussitôt.

De même si l'on fait fondre du phosphore dans un tube

en verre rempli d'eau à 50° environ (fig. 117), et si on verse goutte à goutte avec un petit entonnoir de l'eau froide de manière à déplacer l'eau chaude par un tube de déversement latéral, on pourra faire descendre le phosphore à 29°, c'est-à-dire à près de 15° au-dessous de son point de fusion. Si pendant ce refroidissement on vient à toucher le phosphore avec la pointe de l'entonnoir, il se solidifie en partie, et la masse entière remonte à 44° et se solidifie ultérieurement en totalité.

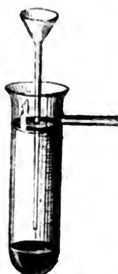


Fig. 117.

Mais ce n'est jamais que dans ces circonstances exceptionnelles d'immobilité complète du liquide qu'il y a une différence entre la température de fusion et la température de congélation. Dans les cas ordinaires, ces deux températures sont les mêmes.

Dilatation de l'eau par la congélation.—Lorsqu'un corps passe de l'état solide à l'état liquide, il y a changement de volume, et par suite de densité. Généralement le volume augmente, par conséquent la densité diminue. Quelques corps cependant ont une densité moindre à l'état solide. L'eau est un exemple que nous pouvons citer. Tout le monde sait que la glace flotte à la surface de l'eau ; la densité de la glace est 0,93. Ainsi, d'après le principe de l'équilibre des corps flottants, le volume de glace qui plonge dans l'eau est les 93/100es du volume total de la glace, et le volume qui surnage en est les 7/100es. Il n'est pas rare de voir dans les mers polaires des blocs de glace qui dépassent la surface de l'eau de près de 15 mètres : cela supposerait alors pour l'épaisseur totale du bloc, en le supposant cubique, un peu plus de 200 mètres. Mais il faut remarquer d'abord que la glace ne plonge point dans l'eau pure, mais dans l'eau de mer, dont la densité est un peu supérieure, puisque la glace n'est pas toujours compacte et laisse des vides où l'eau peut pénétrer, enfin que l'air que l'eau tient en dissolution s'en trouve séparé par le fait de la congélation, et, restant emprisonné dans la masse solide, diminue notablement sa densité moyenne.

Il en résulte que la hauteur totale est beaucoup moindre et ne va guère qu'à 60 mètres.

Cette augmentation de volume qu'éprouve l'eau en se solidifiant, explique les effets produits par la gelée sur les plantes. La séve logée dans le tissu végétal, en devenant solide par l'effet du froid, déchire les parois qui la renferment, et lacère les organes ; lorsqu'ensuite la température se radoucit, la décomposition arrive promptement et les tissus se pourrissent. On ne s'étonnera plus maintenant qu'un vase plein d'eau et fermé se brise quand le froid gèle le liquide qu'il contient. Il n'est même pas nécessaire que le vase soit fermé pour que cet effet se produise, car s'il présente un col rétréci, la congélation commençant par la surface, qui se refroidit évidemment plus vite que l'intérieur de la masse, la glace qui se formera dans le col produira l'effet d'un bouchon, et le vase se trouvant fermé par elle, devra indubitablement se briser.

La force de l'expansion de la glace est tellement grande qu'un canon de pistolet rempli d'eau et hermétiquement fermé avec un bouchon en fer, soudé à froid, est brisé par la congélation du liquide qu'il renferme. On cite encore une expérience du même genre faite par Hall. Un obus fut rempli d'eau et fermé avec un tampon en bois, puis laissé au dehors à une température de 12 à 15 degrés au-dessous de zéro. Au bout d'un certain temps, on entendit une détonation assez forte, et l'on trouva le tampon projeté à plusieurs pieds de l'obus. La glace formait un mamelon fortement saillant en dehors de l'ouverture de l'obus. La projection du bouchon avait seule préservé le fer de la rupture.

La locution vulgaire : *il gèle à pierre fendre*, est l'expression fidèle de l'effet produit par le froid sur certains calcaires poreux, impropres pour cela même aux constructions; ils absorbent en grande quantité l'humidité de l'air, puis se fendillent et se délitent quand le froid arrive et gèle l'eau interposée. On les connaît sous le nom technique de *pierres gélives*. Pour les reconnaître on n'a qu'à les tremper dans de l'eau et les exposer ensuite à un

froid de quelques degrés au-dessous de zéro. Elles deviennent alors friables et s'écrasent entre les doigts très-facilement. On peut encore les mettre en contact avec une dissolution saturée de sulfate de soude, puis les abandonner à l'air. Le sel cristallise dans les interstices et augmente de volume en devenant solide, ce qui produit le même effet que la glace.

La chaleur, en faisant passer un corps solide à l'état liquide, détruit la cohésion qui unissait ses parties ; si on laisse ensuite refroidir le liquide très-lentement, la cohésion renaît et le corps se solidifie. En outre, on remarque souvent que le corps affecte, en se solidifiant, des formes géométriques régulières; il cristallise, et les cristaux sont d'autant plus nets que le refroidissement est plus lent. Nous renverrons pour les détails relatifs au phénomène de la cristallisation, au cours de chimie de l'année de seconde.

Lorsque nous avons défini les trois états sous lesquels se présentent les corps, nous avons établi que dans les liquides la cohésion, tout en étant plus faible que dans les corps solides, n'est cependant pas nulle. Aussi la différence entre ces deux états n'est-elle pas toujours bien tranchée. Quand on fait fondre de la résine, par exemple, elle n'arrive jamais à une fluidité parfaite et reste toujours pâteuse à ce point qu'en renversant le vase qui la renferme on a de la peine à faire couler le liquide. Beaucoup de corps ne passent à l'état de liquides parfaits qu'en prenant d'abord cet état pâteux qu'ils conservent dans une étendue de température quelquefois très-grande. Ainsi le fer se ramollit bien avant de se fondre; c'est même une des qualités les plus précieuses de ce métal, puisqu'elle permet de le travailler et de lui donner toutes les formes imaginables. Il en est de même du verre qui, lorsqu'il devient rouge, peut se plier, se souder, se souffler en boules et prendre dans les mains de l'émailleur les formes les plus variées.

Le soufre offre une anomalie très-singulière; il prend aussi l'état pâteux, mais ce n'est pas comme transition

entre l'état solide et l'état liquide; car à 115° le soufre devient parfaitement fluide; puis vers 190° sa masse perd cette fluidité et devient de plus en plus pâteuse; à 260°, la cohésion est telle, qu'on peut retourner le vase sans renverser le liquide. A partir de cette température, la fluidité revient, mais jamais aussi complète que dans le principe.

Dissolution.—Le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide ne se fait pas toujours sous l'influence de la chaleur. Les forces chimiques remplacent quelquefois la chaleur comme agents de liquéfaction. Ainsi, lorsqu'on met du sucre ou du sel de cuisine dans l'eau, ces corps perdent la forme solide; ils se mêlent à l'eau en devenant liquides avec elle et constituent alors, par suite de ce mélange, ce que l'on appelle une *dissolution*. Le corps se retrouve dans la dissolution avec tous les caractères qu'il avait auparavant, sauf le changement d'état.

Le corps solide peut se dissoudre dans le liquide en toutes proportions jusqu'à une certaine limite supérieure. Cette limite atteinte, la dissolution est dite *saturée*.

La quantité maximum de substance solide que l'on peut dissoudre dans un poids donné d'un liquide, change avec la nature du solide, avec celle du dissolvant et avec les conditions de température.

Généralement l'élévation de la température recule la limite de saturation. Cependant il y a des corps, la chaux, par exemple, qui sont moins solubles dans l'eau chaude que dans l'eau froide. Le sulfate de soude ordinaire a son maximum de solubilité dans l'eau à 33°.

Si l'on prend une dissolution saturée d'un corps plus soluble à chaud qu'à froid, et si on l'abandonne à un refroidissement lent, la capacité de saturation s'abaissant avec la température, le corps dissous doit retourner à l'état solide, et, pour ainsi dire, molécule à molécule; dès lors, il cristallise au sein de la liqueur. C'est ce que l'on appelle la cristallisation par voie humide, par opposition au mode de cristallisation que nous citions quelques lignes plus haut, et qui a lieu par voie ignée.

Une dissolution faite à froid et que l'on abandonne à l'air libre, cristallise aussi, si le dissolvant est volatil, et même dans ce cas, les cristaux sont ordinairement plus nets et plus beaux.

Vaporisation. — De même que les corps peuvent passer de l'état solide à l'état liquide, ils peuvent aussi quitter l'état liquide pour devenir gazeux, et réciproquement. Déposons uue goutte d'eau sur une assiette, et abandonnons-la à elle-même ; nous la verrons petit à petit s'amoindrir, puis disparaître complétement. L'eau n'est cependant pas anéantie, et, si nous ne la voyons plus, c'est qu'elle s'est mélangée à l'air sous la forme d'un gaz invisible comme lui ; elle s'est *évaporée*. L'alcool et l'éther disparaîtraient de la même manière et plus rapidement encore. Pour retrouver dans l'air ces vapeurs, il suffirait d'y introduire un corps ayant pour elles une affinité chimique assez grande. Mettons, par exemple, sous une cloche bien sèche une petite soucoupe contenant de l'eau, et une assiette dans laquelle on aura déposé de la potasse ou du carbonate de potasse, substances très-avides d'humidité ; et nous verrons, en même temps que le niveau de l'eau s'abaisse dans la soucoupe, la potasse s'huméfier et finir par devenir presque liquide par le fait de l'eau qu'elle aura absorbée et qui a augmenté notablement son poids, comme on peut s'en assurer par la balance.

Suivant que l'expérience sera faite par un jour froid de l'hiver ou pendant les chaleurs de l'été, l'évaporation se produira avec lenteur ou rapidement. Ainsi la température a une grande influence sur la formation des vapeurs. Aussi le mercure, qui ne donne pas de vapeurs à la température ordinaire, en fournit au contraire en quantité très-sensible, si on le porte à 30 ou 40°. Il est un moyen très-simple de s'en assurer : l'or, au contact du mercure, forme un amalgame blanc, et devient cassant. Si dans un flacon à demi plein de mercure on suspend à une petite distance du liquide une feuille d'or, elle reste intacte tant que la température est peu élevée ; mais si on

porte le flacon à 40° en le plongeant dans de l'eau tiède, au bout de quelque temps on voit les feuilles d'or blanchir par l'action de la vapeur du mercure[1].

Si nous nous adressons au soufre, nous le verrons donner des vapeurs très-visibles à l'œil vers la température de 300°; l'arsenic en donne aussi à peu près à la même température. L'antimoine ne fournit de vapeurs sensibles qu'à la température rouge; l'argent, seulement à la chaleur blanche. On voit où ceci nous conduit : à admettre que tous les corps liquides peuvent fournir des vapeurs si on les chauffe suffisamment, à moins cependant que l'on n'opère sur des corps composés dont les éléments, unis par une affinité peu énergique, se séparent par l'action de la chaleur.

Si maintenant nous plaçons une goutte d'eau sur la platine de la machine pneumatique, en la recouvrant avec la cloche; puis si nous en mettons une seconde sur la même platine, mais en dehors de la cloche, nous verrons, en faisant jouer les pistons, que la première goutte disparaît avec une très-grande rapidité, pendant que la seconde ne s'évapore au contraire que très-lentement. Ainsi la diminution de la pression favorise l'évaporation, et cela va pour ainsi dire de soi-même. On comprend sans peine que la pression exercée sur la surface du liquide s'oppose au dégagement de la vapeur, non point en l'empêchant complétement, car la goutte extérieure finit par s'évaporer entièrement tout aussi bien que l'autre, mais au moins en le ralentissant d'une manière notable.

Il suit de là que si l'on combine ensemble les deux moyens, l'échauffement du liquide et la raréfaction de l'atmosphère gazeuse qui presse sur la surface, on obtiendra plus rapidement encore l'évaporation. C'est ce que l'on fait, par exemple, dans les ateliers de raffinerie

1. Les liquides, que dans le langage usuel on appelle *volatils*, sont ceux qui fournissent des vapeurs en quantité appréciable à la température ordinaire, ou au moins à des températures peu élevées. En chimie on l'applique à tous les corps qui donnent des vapeurs, quelle que soit la température de leur vaporisation.

pour concentrer les sirops, c'est-à-dire faire évaporer en partie l'eau qui tient le sucre en dissolution.

Liquéfaction des vapeurs et des gaz. — Si au contraire on soumet une vapeur au refroidissement, ou bien si l'on augmente la pression qu'elle supporte, on doit la ramener à l'état liquide. Ainsi, quand dans un air chaud et chargé de vapeur d'eau on apporte un corps froid, immédiatement la vapeur, refroidie par le contact de ce corps, se dépose en partie à sa surface. Ce phénomène, opposé à l'évaporation, a reçu le nom de *condensation*. C'est encore pour cette raison que la vapeur d'eau qui s'échappe de nos poumons pendant l'acte de la respiration, lancée en hiver dans l'air froid, s'y condense en petites gouttelettes qui forment un brouillard visible; tandis qu'en été la vapeur, rencontrant un air chaud, s'y mêle sans se liquéfier.

Les vapeurs présentant avec les gaz une grande analogie, il était probable que les gaz devaient pouvoir se transformer en liquide par les moyens qui réussissent avec les vapeurs. L'expérience a montré, en effet, que, à l'exception d'un très-petit nombre (l'oxygène, l'azote, l'hydrogène entre autres), les gaz peuvent être ramenés à l'état liquide, soit par un refroidissement plus ou moins énergique, soit par une forte pression. Ainsi on liquéfie le gaz qui se produit quand le soufre brûle à l'air et que l'on appelle l'*acide sulfureux*, en le faisant passer dans un tube en U (fig. 118), entouré d'un mélange de glace et de sel dont la température est d'environ 17° au-dessous de zéro. Si l'on soumettait en même temps le gaz à une

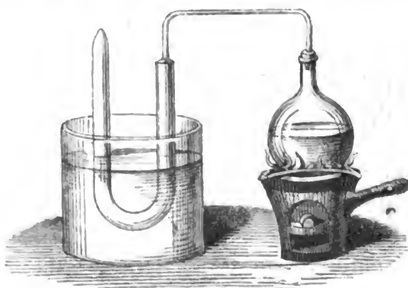


Fig. 118.

pression de 5 à 6 atmosphères, on n'aurait pas besoin de l'exposer à un froid aussi considérable.

Avant de quitter ce sujet, nous noterons qu'il est des substances qui passent de l'état solide à l'état de vapeur immédiatement, sans prendre comme transition la forme liquide. Tels sont en particulier l'arsenic et le camphre. Ce mode particulier de vaporisation porte le nom de sublimation. Un corps se sublime lorsque la température de fusion et le point d'ébullition du liquide se confondent de telle sorte que le liquide se résout en vapeur à mesure qu'il se forme. Mais si on empêche par la pression cette transformation en vapeur, alors la liquéfaction aura lieu. Il suffira d'enfermer de l'arsenic dans un tube en verre complétement fermé et de chauffer ; on amènera ainsi le corps à l'état liquide. Les premières portions de vapeur formées pressent comme un gaz, par leur élasticité, sur l'arsenic, et, empêchant par là la formation de nouvelles vapeurs, permettent au corps de se liquéfier.

Chaleur latente. — Il nous reste maintenant à expliquer la constance de la température de fusion malgré l'action continue du foyer de chaleur. Que devient cette chaleur que le foyer cède au corps et qui cependant ne fait pas varier la température ? Quel rôle joue-t-elle?

Et d'abord y a-t-il réellement de la chaleur absorbée? Pour s'en convaincre, il suffit de mettre en contact un kilogramme d'eau à 79° et un kilogramme de glace à 0°, et d'agiter rapidement pour qu'il y ait le moins de chaleur possible perdue en dehors. On obtient alors deux kilogrammes d'eau à zéro. Ainsi la chaleur qu'a abandonnée le kilogramme d'eau en descendant de 79° à zéro, chaleur qui est la même que celle qu'il faudrait lui fournir pour l'élever de zéro à 79°, a été employée tout entière à transformer le kilogramme de glace en un kilogramme d'eau à zéro, sans changement de température.

Les physiciens, prenant pour terme de comparaison, pour unité de chaleur, la quantité de chaleur nécessaire pour élever un kilogramme d'eau de zéro à 1°, ont reconnu que pour porter d'une température déterminée à

une autre température déterminée un kilogramme des diverses substances, plomb, zinc, verre, etc., il fallait des quantités de chaleur différentes : de là on conclut nécessairement qu'à une même température les différents corps pris sous le même poids contiennent des doses de chaleur inégales. En comparant le phosphore solide et le phosphore liquide, la glace et l'eau, dans les limites de température où le phosphore et l'eau peuvent se trouver sous les deux états, on a retrouvé aussi cette différence, et le corps liquide exige plus de chaleur que le même corps à l'état solide pour subir la même variation de température. La conséquence est que le corps à l'état liquide contient une somme de calorique plus grande. Ainsi le phosphore liquide à 44° ou le plomb liquide à 332° contiennent plus de chaleur que le phosphore solide ou le plomb solide à ces mêmes températures. Mais alors même qu'on trouverait qu'il faut moins de chaleur au corps liquéfié qu'au corps solide pour subir une même variation de température, cela n'empêcherait pas d'admettre qu'à la plus basse température où le corps peut présenter les deux états, il renferme plus de chaleur à l'état liquide qu'à l'état solide ; seulement la différence des deux sommes de calorique irait en décroissant au fur et à mesure qu'on prendrait une température plus élevée, et c'est précisément ce que nous trouverons plus tard quand nous étudierons le phénomène de la transformation de l'eau en vapeur.

C'est cette différence des deux sommes de calorique possédées par le corps liquide et le corps solide à la température de fusion que le foyer est obligé de fournir au corps solide au moment de sa liquéfaction. On l'appelle en physique *chaleur latente de fusion.* Par ce mot de chaleur *latente* on a voulu exprimer que cette quantité de chaleur pénétrait dans le corps sans produire de changement sensible au thermomètre, et qu'elle était simplement chargée de déterminer le passage de l'état solide à l'état liquide. On admet donc ainsi dans le corps liquide deux espèces de chaleur ; l'une *sensible* au thermomètre

et qui donne au corps sa température, l'autre *latente* et chargée d'un rôle purement mécanique, celui de détruire la cohésion. Ne serait-il pas plus simple d'admettre que la somme tout entière de calorique contenue dans le corps liquide est chargée des deux rôles à la fois, et d'effacer cette distinction qui n'est point nécessaire pour expliquer les faits ?

Dans l'expérience de la surfusion de l'eau nous avons fait remarquer qu'au moment où la congélation venait à se produire, il n'y avait qu'une partie de la masse solidifiée, et que le tout, solide et liquide, remontait à zéro. Cela prouve que la quantité de chaleur contenue dans l'eau liquide à—12° est plus grande que celle que devrait contenir la glace à zéro, mais moindre que celle que contiendrait l'eau liquide à zéro également. D'où il résulte que cette somme de chaleur se distribuera entre une portion de masse solide et une portion de masse liquide, toutes deux à zéro.

Mélanges réfrigérants. — La dissolution d'un corps solide dans l'eau doit être évidemment accompagnée d'un abaissement de température, puisque le corps passe à l'état liquide sans recevoir la quantité de chaleur *latente* nécessaire à sa fusion. C'est en effet ce qui arrive. Ainsi la dissolution du sulfate de soude ordinaire dans l'eau détermine un abaissement de température de plusieurs degrés au-dessous de zéro.

Si, au lieu de mettre le sel en contact avec l'eau liquide, on le met en contact avec de la glace, le refroidissement est plus grand encore ; car ici la force chimique de dissolution fera liquéfier les deux corps à la fois ; or, le sel et la glace contiennent une certaine somme de calorique moindre que celle que devraient renfermer ces deux corps pris à l'état liquide à la même température. Une force extérieure, affinité chimique, force de dissolution, peu importe, les rend liquides. Dès lors cette quantité de chaleur étant insuffisante pour les maintenir à cette température, une fois qu'ils sont liquéfiés, elle pourra toujours les maintenir à une température plus basse ; et

c'est à cette température que descendra la masse totale liquéfiée.

Le froid produit par les mélanges de cette nature, appelés *mélanges frigorifiques* ou *réfrigérants*, dépend de la nature des substances qu'on y emploie et de la température qu'elles possèdent au moment de leur mélange. Le refroidissement est d'autant plus grand que les matières mélangées étaient à plus basse température quand on les a mises en contact. Il ne faudrait pas croire, cependant, qu'on pût obtenir un refroidissement indéfini. Il est nécessairement limité, et parce que l'action réciproque des substances qui détermine leur liquéfaction ne se produit plus si elles sont prises par trop froides, et parce que les objets environnants tendent à réchauffer le mélange.

Principaux mélanges frigorifiques.

Matières mélangées.	Poids relatifs.	Température initiale.	Température finale.
Neige Sel marin	1 1	0°	—18°
Neige Chlorure de calcium hydraté	2 3	0°	—28°
Neige Potasse	3 4	0°	—28°
Neige Acide sulfurique étendu	1 1	— 6°,66	—51°
Neige Sel marin Nitrate d'ammoniaque	12 5 5	—27°,77	—31°,66
Neige Chlorure de calcium hydraté	1 3	—40°	—58°
Neige Acide sulfurique étendu	8 10	—55°	—68° [1].

Il est encore une restriction des plus importantes à apporter à la théorie des mélanges réfrigérants. Toute action chimique développe de la chaleur. Il pourra donc

1. Le mélange réfrigérant dont on fait usage dans la glacière des ménages pour fabriquer de la glace, faire des glaces ou des sorbets, se compose de sulfate de soude et d'acide chlorhydrique.

se faire que le mélange de deux substances, qui agissent chimiquement l'une sur l'autre et se liquéfient, développe la quantité de chaleur nécessaire pour maintenir la masse à sa température initiale ou même pour la porter à une température plus élevée. Dans le tableau que nous venons de donner des principaux mélanges réfrigérants, nous voyons que des poids égaux d'acide sulfurique étendu d'eau et de neige, donnent un froid qui peut aller à 51° au-dessous du zéro; si l'on prenait au contraire 4 parties en poids d'acide sulfurique concentré pour une partie de neige, on verrait la température s'élever rapidement à près de 100°. Cela tient à ce que, dans ce dernier cas, la chaleur, développée dans la combinaison de l'acide sulfurique avec l'eau, est plus que suffisante pour liquéfier la petite quantité de neige employée, de telle sorte qu'il en résulte pour la masse un échauffement considérable.

De même quand on prend le sulfate de soude du commerce qui contient de l'eau en combinaison, et qu'on lui enlève cette eau par l'action de la chaleur, de manière à le rendre *anhydre*, d'*hydraté* qu'il était auparavant; si après cela on le met en contact avec l'eau, au lieu d'avoir un refroidissement, on aura une élévation de température considérable, parce qu'il n'y aura plus simplement dissolution; il y aura en même temps combinaison chimique du sel avec l'eau, combinaison qui développera plus de chaleur qu'il n'en faut pour maintenir la masse liquéfiée à sa température première.

Nous n'en avons point fini avec la chaleur *latente*; dans un des prochains chapitres nous aurons à y revenir en parlant du passage des corps de l'état liquide à l'état de vapeur, et en particulier de l'ébullition. Mais si l'on a bien compris ce qui est relatif au phénomène de la fusion, on ne trouvera plus de difficultés dans les faits relatifs au calorique latent de vaporisation, les principes étant exactement les mêmes.

CHAPITRE XIII.

FORCE ÉLASTIQUE DES VAPEURS.

Nous avons déjà fait sentir la différence qui existe entre la formation des vapeurs dans le vide, et leur formation dans l'air. Nous avons vu dans l'air la vapeur se produire lentement, tandis que, sous le récipient de la machine pneumatique, le changement d'état a lieu au contraire avec rapidité. Dès l'instant où l'air est un obstacle à la production des vapeurs, il importe d'opérer dans le vide complet pour simplifier le plus possible le phénomène, et écarter les causes étrangères qui peuvent le modifier. Le vide barométrique étant le plus complet, voici comment nous procéderons.

Nous prendrons un tube de baromètre que nous remplirons de mercure en laissant seulement à la partie supérieure un espace libre d'à peu près deux centimètres, et nous achèverons le remplissage avec de l'eau, ou de l'alcool, ou de l'éther; puis fermant le tube avec le doigt, nous le retournerons de manière à faire monter le liquide volatil au haut de la partie fermée, et nous plongerons ensuite le tube dans le mercure. A peine le doigt a-t-il découvert, en se retirant, l'orifice du tube, que l'on voit le mercure descendre rapidement le long des parois et s'arrêter, après quelques oscillations verticales, à une position fixe d'équilibre (fig. 119). Si un tube barométrique ordinaire est dressé à côté, sur la même cuvette, on reconnaîtra que le niveau est notablement plus bas dans le baromètre à vapeur que dans le baromètre sec. On ne peut point attribuer à la pression qu'exerce la petite colonne de liquide *ac* l'abaissement du niveau : car les lois de l'équilibre voudraient que la colonne d'eau *ac* fut 13 fois $\frac{1}{2}$ aussi haute que la colonne de mercure qui

lui ferait équilibre, tandis qu'elle est au contraire plus petite. Il faut donc admettre l'existence d'une pression exercée sur la surface *c*. Cette pression, c'est la vapeur formée qui la produit. Ainsi, comme les gaz, la vapeur a une force élastique, et cette force élastique peut se mesurer, en négligeant la pression insignifiante de la couche liquide *ac*, par la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes, car la pression de la vapeur fait bien équilibre à la colonne *bd*.

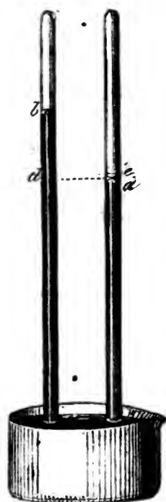


Fig. 119.

Il est très-importaut de remarquer que le mouvement de descente de la colonne mercurielle s'opère très-rapidement, sinon instantanément, et que cette colonne une fois arrivée en *d* ne descend plus, bien qu'il reste un petit excès de liquide à sa surface.

A température égale, les liquides volatils, et j'entends par ce nom les liquides qui fournissent des vapeurs en quantité sensible aux températures ordinaires, ont des forces élastiques très-différentes. On peut s'en convaincre en montant sur une même cuvette quatre tubes barométriques : un baromètre sec, un baromètre à vapeur d'eau, un baromètre à vapeur d'alcool et un baromètre à vapeur d'éther. On verra que les différences entre le niveau du mercure dans le premier tube et le niveau du mercure dans les trois autres, sont très-inégales. Ainsi, si l'expérience est faite à la température de 15°, la différence sera, pour le baromètre à vapeur d'eau, d'environ 1 centimètre; pour le baromètre à vapeur d'alcool, de 4 à 5 centimètres, et pour le baromètre à vapeur d'éther, de 35 centimètres.

Nous savons déjà que deux circonstances font varier la force élastique d'une masse gazeuse : le changement de volume et le changement de température. Comme jus-

qu'à présent nous avons vu les vapeurs présenter toutes les apparences des gaz, il est nécessaire de rechercher si cette analogie est complète, s'il y a au contraire des différences et quelles elles sont : voyons par conséquent quelle sera aussi sur la vapeur d'eau, que nous prendrons pour type des vapeurs, l'influence de la variation du volume et de la variation de température.

Influence du volume. — Pour la première étude, prenons le baromètre à cuvette profonde dont nous avons déjà fait usage, quand il s'est agi de vérifier la loi de Mariotte pour de faibles pressions. Nous remplissons un long tube barométrique de mercure en laissant place pour une couche d'eau de 1 centimètre d'épaisseur environ, et nous le mettons en place sur la cuvette, comme il a été dit plus haut, en prenant toutes les précautions indiquées au chapitre des baromètres, pour qu'il n'y ait point d'air dans le tube, et qu'il ne renferme en fait de fluide élastique que la vapeur d'eau. Nous mesurons à l'aide d'une règle divisée la hauteur de la colonne mercurielle et aussi l'épaisseur de la petite couche liquide qui repose sur le mercure. La différence entre la hauteur du mercure dans un baromètre sec placé à côté et la hauteur du mercure dans notre tube, nous donne la force élastique de la vapeur.

Ces mesures prises, soulevons le tube verticalement en le faisant glisser le long de la colonne liquide, ce qui aura évidemment pour effet d'agrandir l'étendue de la chambre de vapeur. S'il s'agissait d'un gaz, nous savons ce qui arriverait : la force élastique du gaz deviendrait d'autant moindre que le volume occupé par lui serait plus grand, et le mercure monterait par conséquent dans le tube à une plus grande hauteur. Dans l'expérience actuelle, il n'en est pas ainsi : nous voyons le niveau du mercure rester absolument invariable; mais en même temps l'épaisseur de la couche d'eau diminue, et cela continue ainsi jusqu'à ce que tout le liquide volatil ait disparu. Qu'en conclure? que la force élastique reste constante, et qu'elle reste constante parce que, dès l'instant où l'espace

s'agrandit d'une certaine quantité, le liquide fournit une quantité de vapeur proportionnelle. Abaissons le tube, au contraire, de manière à diminuer l'étendue de la chambre de vapeur. En pareil cas, un gaz augmenterait de force élastique et la colonne de mercure s'abaisserait. Ici, rien de pareil; la hauteur de cette colonne demeure encore invariable, et de plus on voit l'épaisseur de la couche de liquide augmenter. Par conséquent la force élastique reste constante, et cela parce que la quantité de vapeur qui remplissait la portion d'espace retranché à la chambre barométrique est retournée à l'état liquide. Et l'on pourra, en abaissant le tube de plus en plus, ramener à l'état liquide toute la vapeur formée.

Ainsi en résumant les résultats de cette double expérience, on voit que lorsque la vapeur est en présence du liquide qui la fournit, elle conserve, quel que soit le volume qu'on lui fait occuper, une force élastique invariable, et par suite une densité constante.

Force élastique maximum. — Remontons maintenant le tube jusqu'au point où la couche liquide disparaît, complétement vaporisée; et à partir de cette position, donnons un nouvel agrandissement à la chambre de vapeur. Alors la colonne de mercure augmente de hauteur, ce qui indique une *diminution dans la force élastique.* Si nous comparons les volumes occupés par la vapeur dans les diverses positions que nous pourrons donner au tube. quand le liquide n'est plus en présence, à la force élastique mesurée par la différence entre la hauteur du baromètre sec et la hauteur du baromètre à vapeur, nous constaterons que la vapeur se comporte comme un gaz, et qu'elle suit la loi de Mariotte : les élasticités sont en raison inverse des volumes.

Cette loi n'est cependant en général exactement applicable aux vapeurs que lorsqu'elles ont subi une certaine dilatation, par la même raison qui fait que les gaz liquéfiables ne la suivent plus lorsqu'ils approchent de leur point de condensation.

Il suit de là que la force élastique que peut avoir une

vapeur à une température donnée est la plus grande possible quand cette vapeur est en présence du liquide qui la fournit. Cette force élastique s'appelle *force élastique* ou *tension maximum.* La densité reste constante quand la force élastique ne change pas, et diminue quand, le liquide n'étant plus en présence de la vapeur, le volume de cette vapeur augmente; elle est donc *maximum* quand la tension l'est elle-même.

Quand un espace est rempli de vapeur ayant sa tension maximum, on dit que cet espace est *saturé* ou que la vapeur y est *à saturation.*

Prenons donc un espace renfermant de la vapeur assez éloignée de la saturation, c'est-à-dire ayant une tension notablement plus faible que sa tension maximum, et diminuons de plus en plus le volume occupé par cette vapeur; nous augmenterons par là sa force élastique. Quand cette force élastique sera devenue égale à la tension maximum, si nous continuons à diminuer le volume, la vapeur se condensera, comme nous l'avons dit plus haut. Ainsi se trouve expliquée la condensation des vapeurs par la pression dont nous avons parlé dans le chapitre précédent. Et puisque les vapeurs éloignées du point de saturation se comportent comme le gaz, il est naturel d'admettre que les gaz ne sont autre chose que des vapeurs éloignées du point de saturation et de leur appliquer, pour les liquéfier, la même méthode.

Influence de la température. — Nous avons jusqu'à présent supposé que la température restait la même; étudions actuellement l'influence du changement de température. Nous n'aurons pour cela qu'à reprendre la même série d'expériences aux différents points de l'échelle thermométrique.

Le tube barométrique contenant du mercure avec une couche d'eau ou d'éther, étant enveloppé, dans la partie où se forme la vapeur, par un manchon cylindrique ou prismatique en verre, on établira dans ce manchon de l'eau que l'on portera à une température plus ou moins élevée. Et l'on constatera qu'à toute température la vapeur

mise en présence de son liquide conserve une force élastique indépendante du volume qu'on lui fournit; et que lorsque la vapeur n'est plus en présence de son liquide, elle change de force élastique quand on augmente ou qu'on diminue son volume, en suivant la loi de Mariotte, pourvu que la vapeur soit un peu éloignée de la saturation; qu'ainsi il y a pour chaque température une force élastique maximum, et une densité maximum particulière. Cette tension maximum croît avec une très-grande rapidité, comme on peut s'en convaincre par l'expérience suivante.

On remplit de mercure la branche fermée d'un tube de Mariotte (fig. 120), et l'on introduit par dessous une petite quantité d'éther qui monte à la partie supérieure au-dessus du mercure; puis on plonge le tube dans un grand bocal contenant de l'eau dont on élève progressivement la température. Au premier abord, la colonne mercurielle reste immobile, la pression atmosphérique étant trop grande pour que, à la température où se trouve le liquide, la vapeur puisse se former. Puis, bientôt le niveau s'abaisse. A 37° les deux niveaux sont sur le même plan horizontal, ce qui indique que la force élastique de la vapeur d'éther est égale à la pression atmosphérique; puis le mercure monte rapidement dans la grande branche au fur et à mesure que la température s'élève. En même temps, la couche d'éther diminue de plus en plus et finit par disparaître.

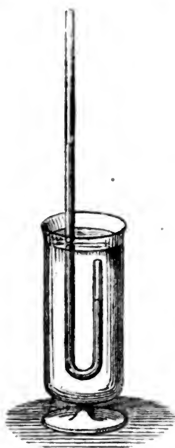


Fig. 120.

La connaissance des forces élastiques maximum de la vapeur d'eau est d'une haute importance dans l'industrie pour la conduite des machines à vapeur. Parmi les physiciens qui se sont surtout occupés de leur détermination numérique, nous citerons particulièrement MM. Dalton,

Gay-Lussac, Arago et Regnault. Nous n'entrerons dans aucuns détails sur les méthodes qu'ils ont suivies, et nous nous bornerons à donner ici les tensions de la vapeur d'eau de 5 en 5 degrés jusqu'à la température de 100° ; et pour les températures plus élevées, nous donnerons, comme dans la plupart des traités de physique, les températures correspondant à des pressions de deux, trois, quatre atmosphères, etc.

Tensions maximum de la vapeur d'eau jusqu'à 100° (*en millimètres de mercure*), *d'après Regnault.*

Températures.	Tensions.	Températures.	Tensions.
0°	4^{mm},60	55°	117^{mm},48
5	6 ,53	60	148 ,79
10	9 ,17	65	186 ,95
15	12 ,70	70	233 ,09
20	17 ,39	75	288 ,52
25	23 ,55	80	354 ,64
30	31 ,56	85	433 ,04
35	41 ,83	90	525 ,45
40	54 ,91	95	133 ,78
45	71 ,39	100	760 ,00
50	91 ,98		

Tensions maximum aux températures supérieures à 100°.

Forces élastiques maximum exprimées en atmosphères de 76 centimètres de mercure.	Températures.
1	100°
2	121°,4
3	135 ,1
4	145 ,4
5	153
10	181 ,6
15	200 ,5
20	214 ,7
30	236 ,2
40	252 ,55
50	265 ,90

Lorsque le liquide est en excès, la vapeur fournie prendra à toutes les températures par lesquelles on la

fait passer la tension maximum et la densité maximum correspondantes. Mais une fois que le liquide sera complétement vaporisé, alors l'élévation de la température augmentera bien encore la force élastique de la vapeur, mais non plus avec la même rapidité. Cette force élastique variera seulement comme celle d'un gaz dans les mêmes circonstances. Elle sera proportionnelle au volume que prendrait la masse, si elle si dilatait librement.

D'après cela, prenons un ballon rempli de vapeur éloignée du point de saturation, et refroidissons-le progressivement. Par le fait de ce refroidissement, la vapeur diminuera de force élastique, comme ferait un gaz en pareille circonstance. Mais les forces élastiques maximum, correspondant aux différentes températures par lesquelles passe la vapeur, décroissent beaucoup plus rapidement. La différence entre la tension de la vapeur et la tension maximum est donc de plus en plus petite, et finira par être nulle. De même que si sur un fil vertical, on faisait descendre deux boules, l'une, la plus basse, glissant très-lentement, l'autre, la plus élevée, descendant très-vite, la seconde finirait par rencontrer la première.

Ainsi, la vapeur atteindra une température pour laquelle sa tension et sa densité seront précisément la tension et la densité maximum ; si on refroidit davantage, la vapeur se condensera en partie, et la quantité de vapeur condensée sera d'autant plus grande que le refroidissement sera plus grand lui-même.

Si, en même temps que l'on refroidit la vapeur, on la comprime pour augmenter sa force élastique, on obtiendra la condensation sans avoir besoin de produire un froid aussi considérable; car alors la force élastique de la vapeur et la tension maximum iront à la rencontre l'une de l'autre, la première croissant, la seconde décroissant; comme si dans l'exemple des deux boules que nous citions tout à l'heure, la boule inférieure remontait au lieu de descendre.

On voit que nous venons de reprendre là dans leur ensemble une partie des faits exposés dans le dernier

chapitre. Mais alors il n'était point question de force élastique; nous nous étions simplement bornés à constater le fait de l'évaporation, les circonstances qui la favorisent et à en déduire alors par analogie les conséquences relatives au phénomène inverse, celui de la liquéfaction. Ici les faits s'établissent rigoureusement, et se présentent comme des corollaires nécessaires, en même temps que très-simples, des observations relatives à l'influence du volume et de la température sur la force élastique des vapeurs.

Formation des vapeurs dans un milieu gazeux. — Les principes que nous venons d'exposer sont relatifs à la formation des vapeurs dans le vide barométrique. Or nous savons que dans l'air la vapeur se forme lentement au lieu de se développer instantanément, et l'on pourrait se demander si dans l'air comme dans le vide, la vapeur est susceptible d'atteindre, à une température donnée, un maximum de force élastique, et si ce maximun est le même que dans le vide.

Or l'expérience a fait voir que si l'on a un récipient, contenant de l'air ou un mélange gazeux quelconque sec, et communiquant avec un manomètre, et si l'on introduit dans ce récipient une quantité convenable d'eau ou d'un liquide volatil quelconque, le mercure du manomètre est progressivement refoulé jusqu'à ce qu'il s'établisse une certaine différence *invariable* de niveau, qui, ajoutée à la hauteur barométrique donne la force élastique totale du mélange. Il y a donc un maximum de tension. En second lieu si de cette élasticité totale, on retranche celle qu'a prise le gaz sec, par suite de la variation du volume, élasticité que l'on peut calculer en appliquant la loi de Mariotte, la différence donne la tension de la vapeur : or cette tension est précisément égale à celle que la vapeur aurait prise dans le vide à la même température. Donc dans un milieu gazeux saturé de vapeur, la tension et la densité de cette vapeur sont les mêmes que si elle se fût formée dans le vide barométriqne.

Densité de la vapeur d'eau. — Si à un appareil aspirateur, de capacité connue et plein d'eau, on adapte une série de tubes en U contenant de la pierre-ponce en petits fragments et imbibée d'acide sulfurique (huile de vitriol), substance éminemment propre à absorber l'humidité; si on fait communiquer le dernier de ce tube avec l'intérieur d'un cy-

lindre rempli de matières spongieuses bien imbibées d'eau, et dans lequel l'air extérieur a un libre accès ; enfin, si les choses disposées de la sorte, on ouvre les robinets de l'aspirateur, l'air appelé par cet aspirateur se saturera d'humidité dans le cylindre, puis passant dans les tubes absorbants, abandonnera aux deux ou trois premiers toute son humidité. L'augmentation de poids de ces tubes donnera donc le poids de vapeur *saturée* contenu, à une température donnée, et par suite avec une force élastique connue, dans un volume d'air égal au volume d'eau sorti de l'aspirateur. Ce poids de vapeur est comme nous l'avons dit plus haut le même que celui qui pourrait saturer un récipient de même dimension, où l'on aurait fait le vide.

Si donc on divise ce poids par le poids calculé du même volume d'air sec, à la même température et à la même pression, on aura la *densité de la vapeur d'eau* par rapport à l'air. Le quotient est constant et égal à 0,622 ou, en fraction ordinaire, sensiblement $\frac{5}{8}$. Ainsi pour calculer le poids d'un volume quelconque de vapeur, saturée ou non, formée dans le vide ou dans l'air, il suffira de calculer le poids d'un égal volume d'air sec pris dans des conditions identiques de pression et de température, et de multiplier le résultat par 0,622.

Principe de Watt. — Lorsqu'un espace est rempli de vapeur, saturée ou non, à une certaine température, si l'on vient à refroidir un des points de cet espace, la vapeur se condense en ce point jusqu'à ce qu'elle n'ait plus dans l'espace tout entier que la tension maximum correspondante à la température du point froid.

Ainsi, supposons que la tension soit à 100° de 200^{mm} dans l'espace *abcdef* (fig. 121), et que l'on porte le point *cd* à la température de 10°, la vapeur se condensera en grande partie en *cd*, et ne gardera plus que la tension maximum correspondante à 10°, c'est-à-dire $9^{mm},17$. Voici pourquoi : la paroi *cd* étant amenée à 10°, la vapeur se refroidit par le contact et prend aussi la température de 10°. Or, la plus grande force élastique de la vapeur à 10° est $9^{mm},17$. Elle ne pourra donc garder sa tension primitive de 200^{m}, et se condensera en *cd* en prenant la tension de $9^{mm},17$. Mais dans un même espace, l'équilibre est impossible entre deux masses gazeuses ayant des forces

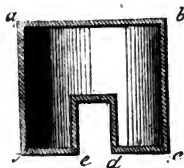


Fig. 121.

élastiques différentes, puisque pour chacune d'elles la force élastique ne serait pas égale à la pression que l'autre masse gazeuse exercerait sur elle. Les deux masses de vapeur, celle qui a pris la tension de 9^{mm}, et celle qui avait gardé la tension de 200^{mm}, se mélangeront donc en prenant alors une tension moindre, il est vrai, que 200^{mm}, mais plus grande encore que 9^{mm},17. Il y aura donc de nouveau condensation en *cd*, et cela continuera évidemment ainsi tant que la force élastique ne sera pas partout 9^{mm},17.

S'il y a de l'eau en *ef*, le phénomène se compliquera ; mais il est cependant facile de prévoir ce qui doit arriver. Alors dans l'espace total la vapeur a la tension maximum qui correspond à la température du liquide. Mais si l'on met la partie *cd* à une température inférieure à 10°, il y a condensation en *cd* et diminution de la tension dans l'espace total ; le liquide fournit alors de la vapeur pour rétablir la tension primitive : nouvelle condensation en *cd*, nouvelle formation de vapeur en *ef*, et ainsi de suite jusqu'à ce que tout le liquide soit passé de *ef* en *cd*. Ces principes ont été établis pour la première fois par l'illustre mécanicien *Watt*, et appliqués par lui aux machines à vapeur, comme nous allons le voir.

Machines à vapeur.— Dans une machine à vapeur il faut distinguer quatre parties essentielles, la chaudière ou générateur de vapeur, le cylindre qui renferme le piston sur lequel s'exerce l'effort de la vapeur, le condenseur, enfin le système de pièces destinées à la transmission du mouvement.

Chaudière. — Dans les machines fixes, la chaudière se compose ordinairement d'un immense cylindre, terminé à ses deux extrémités par deux calottes hémisphériques. Au-dessous sont suspendus, parallèlement et à égale hauteur, deux autres cylindres de plus petit diamètre, appelés les *bouilleurs*. Dans la figure 122, l'un des bouilleurs est caché par l'autre. Ils se rattachent au cylindre principal par deux ou trois tubes dont le diamètre est à peu près égal à celui des bouilleurs eux-mêmes.

Les bouilleurs et la moitié de la capacité de la chaudière sont remplis d'eau. Ces différentes pièces sont disposées dans un massif de maçonnerie qui forme le fourneau, de telle sorte que la flamme enveloppe de toutes parts les bouilleurs et passe sous la chaudière, mais seulement dans la partie recouverte par l'eau. Sur la plate-forme de la chaudière sont pratiquées plusieurs ouvertures : l'une, la plus large, T, est appelé le *trou d'homme*, et sert au nettoyage et à l'inspection de la chaudière ;

une autre S, est fermée par une soupape que presse une tige chargée d'un poids; c'est ce que l'on appelle la *soupape de sûreté.* La charge est réglée de telle manière que si la vapeur vient à dépasser une certaine limite de pression, elle soulève la soupape et s'échappe par l'ouverture devenue libre. Pour plus de sécurité, on ajoute encore à cette soupape une autre ouverture fermée par un disque composé d'un alliage fusible à une température qui correspond à une tension un peu moindre que la tension limite. On comprend que si la vapeur prend une tem-

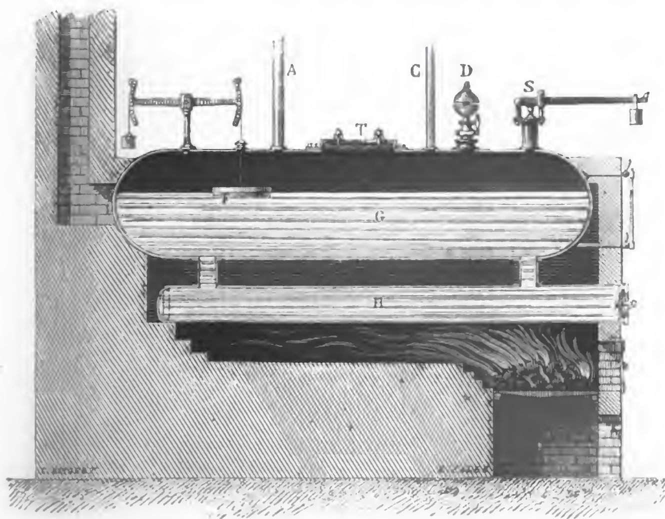
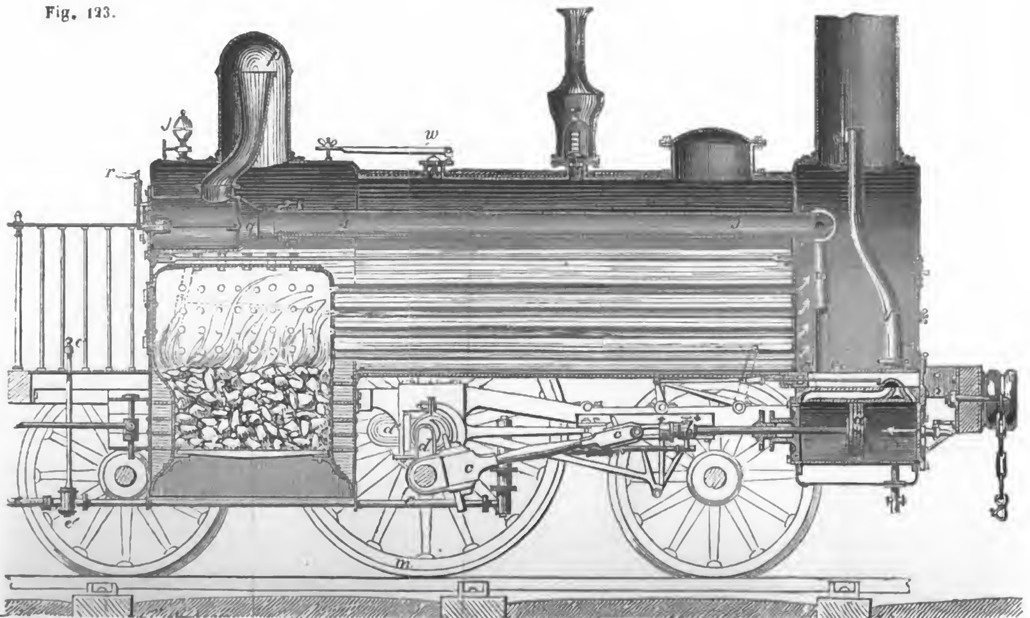


Fig. 122.

pérature trop élevée, la rondelle fusible se fondra et découvrira l'ouverture. On y joint encore d'autres pièces destinées à faire connaître au chauffeur la hauteur du niveau d'eau dans sa chaudière. Tel est, par exemple, le flotteur F qui nage à la surface du liquide et descend avec elle. Le petit tube de verre placé en avant de la chaudière sert au même usage. Enfin, le sifflet d'alarme D a encore le même but. Le tube C sert à emporter la vapeur hors de la chaudière, et le tube A à y amener l'eau destinée à remplacer celle qui s'est évaporée. Dans les locomotives (fig. 123), le foyer est placé dans l'intérieur de la chau-

Fig. 123.



dière, et les gaz chauds produits par la combustion traversent la masse d'eau dans des tuyaux horizontaux. Cette disposition donne une très-grande étendue à la surface de chauffe, et permet de développer avec la plus petite quantité de combustible, et dans le temps le plus court, une grande quantité de vapeur.

Piston moteur. — La vapeur engendrée dans la chaudière est conduite ensuite au cylindre qui contient le piston. La distribution de cette vapeur se fait au moyen d'un petit appareil appelé *tiroir*, dont nous parlerons tout à l'heure. Avant d'entrer dans les détails de construction, faisons comprendre le mode d'action de la vapeur.

On distingue les machines à vapeur en machines à simple effet et machines à double effet, suivant que la vapeur doit agir sur une seule face du piston, ou successivement sur ses deux faces.

Représentons-nous un cylindre en communication libre avec l'atmosphère par sa partie supérieure, et fermé, au contraire, à la partie inférieure (fig. 124). Un piston plein peut glisser à frottement dans ce cylindre; un tuyau *m* fait communiquer l'espace que ce piston laisse au-dessous de lui avec le générateur de vapeur; un autre tube *n* fait communiquer ce même espace avec une caisse appelée *condenseur* maintenue à basse température. Le robinet *m* étant ouvert, et le robinet *n* fermé, la vapeur arrive sous le piston avec une élasticité supérieure à la pression atmosphérique; admettons-la égale à deux atmosphères, ce qui suppose une température d'environ 121°. Le piston supportant sur sa face inférieure une pression de 2 atmosphères, et sur sa face supérieure une pression de 1 atmosphère, devra monter sous l'influence de la différence de ces deux pressions contraires. Lorsqu'il est arrivé au haut de sa course, fermons le robinet *m* et ouvrons le robinet *n*. Alors si la température du condenseur, est, par exemple, de 10°, la tension de la vapeur sous le piston devra, conformément au principe de Watt, descendre à 9 millimètres, tandis que la pression sur la face supérieure reste égale à la pression atmosphérique. Par conséquent le piston devra descendre. Quand il sera arrivé au bas de sa course, on ouvrira de nouveau *m* en fer-

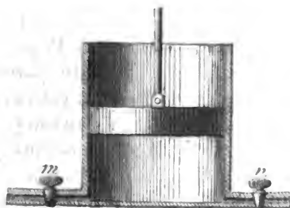


Fig. 124.

mant *n*, et la pression inférieure devenant de nouveau égale à 2 atmosphères, le piston reprendra son mouvement ascendant.

Dans les machines à double effet, le piston sépare deux chambres complétement fermées. Chacune d'elles peut communiquer avec la chaudière ou avec la condenseur. Lorsque la chambre supérieure communique avec la chaudière, sa communication avec le condenseur est fermée; en même temps la chambre inférieure communique avec le condenseur et non avec la chaudière. De cette manière la pression supportée par la face supérieure du piston est la plus forte, et le piston descend. Quand il est arrivé au plus bas de sa course, on renverse toutes les communications, de telle sorte que la vapeur arrive de la chaudière sous le piston, et que la vapeur de la chambre supérieure aille se rendre dans le condenseur; alors le piston remonte.

Tiroir ou **distributeur**. — Voici maintenant comment ces communications s'établissent : Contre la paroi du corps de pompe renforcée par une double épaisseur, se trouve adossée une caisse rectangulaire ou cylindrique, dans l'intérieur de laquelle glisse une boîte creuse dont le bord s'appuie sur la paroi même du corps de pompe (fig. 125 et 126). Trois ouvertures sont pratiquées dans l'épaisseur renforcée de cette paroi. L'ouverture supérieure est l'entrée du tube creusé dans la paroi et qui va déboucher dans la capacité du corps de pompe au-dessus du piston. L'ouverture inférieure communique de la

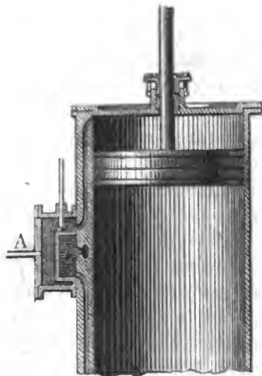


Fig. 125.

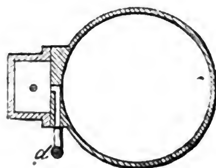


Fig. 126.

même manière avec la chambre que le piston forme au-dessous de lui. Enfin, le conduit du milieu se rejette latéralement pour sortir en *d* (figure 126), et descend au condenseur. La boîte mobile du tiroir a une hauteur telle, qu'elle ne puisse recouvrir

jamais que deux de ces ouvertures à la fois. Dans sa position la plus élevée elle embrasse l'ouverture supérieure et celle du milieu. Dans sa position la plus basse, elle embrasse cette même ouverture du milieu et l'ouverture inférieure. La vapeur arrive de la chaudière dans la caisse qui enveloppe le tiroir par le tuyau A. Dans notre figure le tiroir est dans la position inférieure; la vapeur va donc tourner autour du tiroir et entrer dans la chambre supérieure; en même temps la chambre inférieure communique par les ouvertures *a* et *b* avec le condenseur; le piston est, par conséquent, dans son mouvement descendant. Un peu avant que le piston arrive au plus bas de sa course, la position du tiroir sera changée de telle sorte qu'il vienne couvrir les ouvertures *b* et *c* en laissant découverte l'ouverture *a*. Alors la vapeur entrera dans la chambre inférieure, tandis que celle de la chambre supérieure ira au condenseur; le mouvement du piston sera donc arrêté, puis s'établira en sens inverse. Le tiroir retournera ensuite à sa première position quand le piston, dans son mouvement ascendant, approchera du point le plus haut de sa course. Alors le mouvement d'ascension sera arrêté, et le piston redescendra. Cette manœuvre du tiroir déterminera donc un mouvement de va-et-vient de la tige du piston qu'il sera facile ensuite de transformer en mouvement circulaire.

Dans les machines où la vapeur a une élasticité qui ne dépasse que de très-peu la pression atmosphérique, il y a nécessité absolue d'employer un condenseur pour établir sur les deux faces du piston une différence de pression suffisante. On les appelle *machines à basse pression*. Mais dans les *machines à haute pression*, où la vapeur a une force élastique de 4 à 5 atmosphères et même davantage, l'air extérieur sert de condenseur; telles sont les locomotives. En supposant la force élastique de 5 atmosphères, la différence de pression sera de 4 pressions atmosphériques, puisque la face mise en communication avec l'air ne supportera plus que la pression de l'atmosphère, la vapeur se condensant dans l'air froid.

Détente. — En réglant convenablement le diamètre des orifices *a* et *c* et l'épaisseur de la partie pleine du tiroir qui passe sur ces ouvertures, on peut faire en sorte que la vapeur n'entre dans le corps de pompe que pendant la moitié, le tiers, le quart, etc., de la course du piston. Cette disposition que l'on appelle *détente*, a de grands avantages économiques; car si l'entrée de la vapeur est interceptée à la moitié de la course,

par exemple, la dépense sera évidemment moitié moindre ; il y aura, il est vrai, diminution dans la force de la vapeur, puisque dans la seconde moitié de la course la vapeur se dilatera, se détendra, dans un espace double ; mais comme cette détente n'est complète qu'à la fin du mouvement, la force élastique moyenne sera supérieure à $\frac{1+\frac{1}{2}}{2}$ ou $\frac{3}{4}$. Ainsi, avec une réduc-

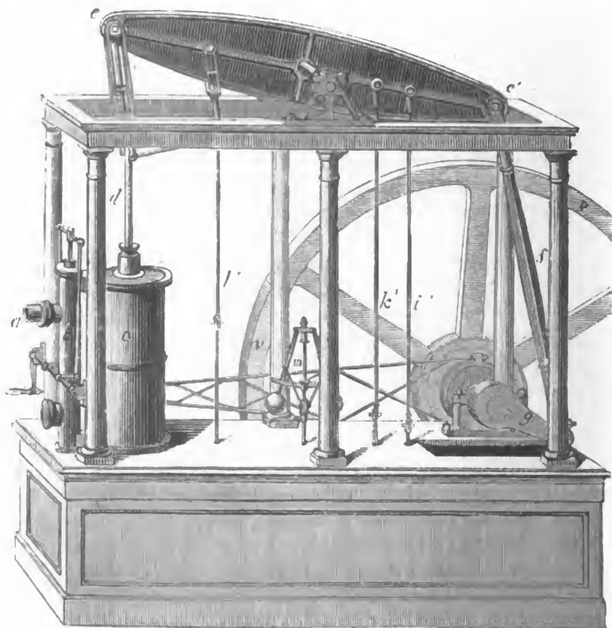


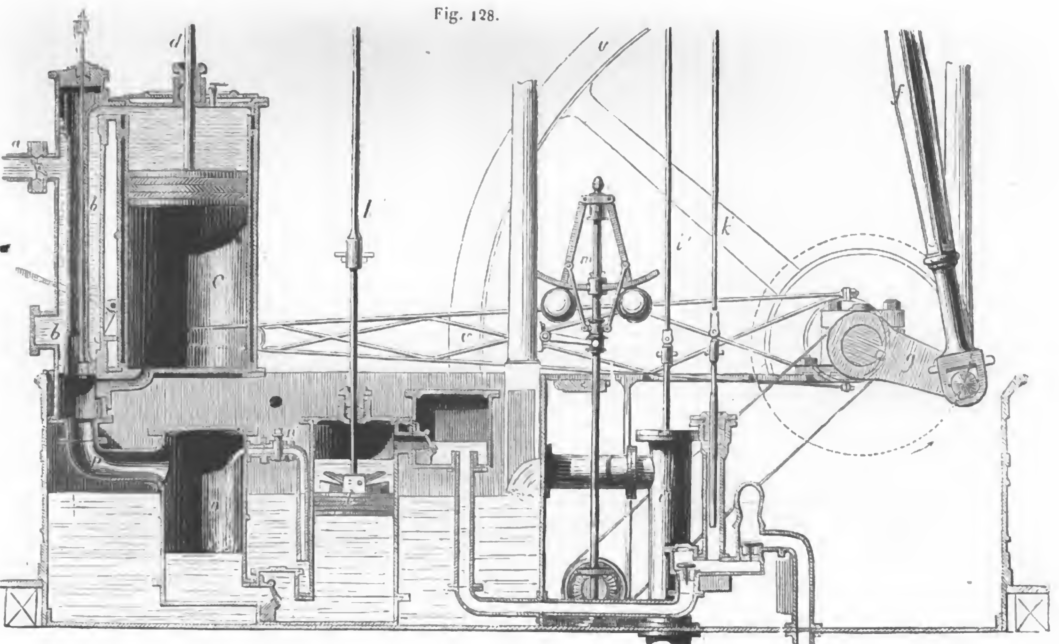
Fig. 127.

tion de moitié de la dépense, il n'y aura qu'une diminution de moins d'un quart dans la force de la vapeur.

Transmission du mouvement. — Il nous reste maintenant à expliquer la transmission du mouvement et le jeu des diverses pièces accessoires. Nous prendrons pour exemple une machine de Watt, à basse pression et à double effet (fig. 127 et 128).

La tige du piston s'attache par un système de pièces articu-

Fig. 128.



lées, formant ce qu'on appelle le parallélogramme de Watt, à l'extrémité du balancier *ee'* mobile autour de son milieu. Comme le point *e* décrit une circonférence dont le point *o* est le centre, tandis que la tige doit monter et descendre verticalement, il y aurait inévitablement flexion et rupture de cette tige si elle s'attachait immédiatement au point *e*. En *e'* s'articule une bielle *f*, qui va s'attacher à la manivelle *g*. Ces pièces *oe'*, *f* et *g*, fonctionnent exactement comme les pièces d'un rouet; *oe'* tient lieu de la planche mise en mouvement par le pied et *g* de la manivelle. La bielle va donc tourner autour du centre *o'*, en entraînant dans ce mouvement de rotation l'arbre de couche dont *o'* est l'extrémité, le volant *v*, et par suite toutes les pièces, roues, tambours, etc., engrenées avec cet arbre de couche.

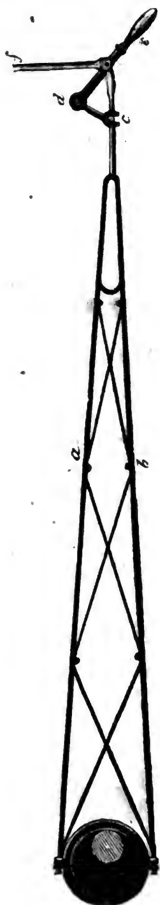


Fig. 129.

Dans les locomotives il n'y a pas de balancier. La bielle *c*, qui fait tourner la manivelle fixée à l'essieu des roues motrices s'attache directement à la tête de la tige du piston (voir fig. 123).

Sur l'arbre de couche est fixée une pièce appelée *excentrique* parce que son centre ne coïncide pas avec le centre *o'* de l'arbre (fig. 129). Par la rotation de l'arbre l'excentrique donne un mouvement de *va-et-vient* à la pièce *ab*, de sorte que le point *c* se déplace de droite à gauche et de gauche à droite. Il en résulte un mouvement d'oscillation du levier coudé *cde* qui fait monter et descendre la tige *f*; c'est à cette tige qu'est attaché le tiroir. L'excentrique est dirigé par rapport à la bielle, de telle sorte que le tiroir arrive au haut de sa course lorsque le piston est à peu près aux $\frac{3}{5}$ de sa course ascendante, et qu'il arrive à sa position inférieure lorsque le piston est aux $\frac{3}{5}$ de sa course descendante.

Les autres pièces sont :

Le condenseur n ;

Une pompe l, qui enlève du condenseur l'eau chaude, provenant de la condensation de la vapeur. Cette eau chaude est amenée par le piston dans une caisse, d'où elle passe à la pompe k ;

Une pompe foulante k, qui renvoie l'eau chaude au générateur.

Toutes ces pièces sont établies dans une grande bâche remplie d'eau froide. C'est cette bâche qui alimente d'eau froide le condenseur par le tuyau n'. Une troisième pompe i, toujours mise en mouvement par le balancier, puise l'eau dans un puits pour l'amener dans la bâche.

On exprime ordinairement la force d'une machine à vapeur par l'effet utile qu'elle peut produire. L'unité de force que l'on emploie comme terme de comparaison est appelée *cheval-vapeur*. C'est la force nécessaire pour élever à 1 mètre en 1 seconde un poids de 75 kilogrammes. Ainsi, une machine de 10 chevaux est celle qui élèverait à 1 mètre en 1 seconde 750 kilog., où qui élèverait 1 kilogramme à 750 mètres dans ce même intervalle de temps de 1 seconde.

Nous renverrons pour de plus amples détails sur les machines à vapeur au *Traité de Physique* de M. Pouillet ou à la notice publiée par Arago dans l'annuaire du bureau des longitudes (année 1839).

CHAPITRE XIV.

ÉBULLITION. — DISTILLATION. — TUBES DE SURETÉ.

Nous n'avons encore traité qu'un cas de la formation des vapeurs, le plus général, il est vrai, c'est-à-dire celui où la vapeur se forme à la surface du liquide d'une manière insensible à l'œil. Mais si l'on amène ce liquide à une température convenable, alors l'aspect du phénomène change complétement; la production des vapeurs a lieu dans toute la masse liquide. Elles se dégagent en bulles qui montent à la surface et y crèvent.

Mettons, par exemple, de l'eau dans un vase en fer-blanc avec un thermomètre qui donne la température du liquide, et plaçons le vase sur un fourneau. Nous verrons le thermomètre monter progressivement; vers 60° des bulles gazeuses s'échappent de l'eau, partant des différents points de la paroi sur laquelle on les a vues apparaître un instant avant qu'elles montent à la surface du liquide. C'est l'air dissous dans l'eau qui s'en dégage. Avec de l'eau qu'on aurait fait bouillir déjà une première fois, en la laissant ensuite refroidir à l'abri de l'air, ce phénomène étranger à l'ébullition ne se manifesterait pas, par la raison que cette eau ne contiendrait pas d'air en dissolution.

La température continuant à s'élever et approchant de 100°, on voit bientôt une agitation particulière se manifester dans la région inférieure de la masse liquide : des bulles apparaissent au fond du vase et disparaissent presque aussitôt; en même temps le liquide fait entendre un son particulier; l'*eau chante*, comme on dit vulgairement. Enfin à 100° environ, les bulles se forment d'abord petit à petit, puis rapidement et en grande quantité, et viennent monter et crever à la surface du liquide.

A partir de ce moment, et tant que durera l'ébullition, le thermomètre conservera une température invariable, pourvu toutefois que pendant la durée de l'opération la pression atmosphérique ne change pas. Nous retrouvons donc là ce caractère de fixité que nous avions signalé dans la fusion. Mais il nous faut remarquer qu'il n'appartient pas au phénomène général de la transformation d'un liquide en vapeur, mais seulement au cas particulier de l'ébullition. En outre, nous avons eu soin de poser comme condition que la pression ne changeât pas. Car, comme nous allons le voir, la température d'ébullition d'un liquide n'est pas toujours la même; elle dépend surtout de la pression qu'il supporte; elle s'élève si la pression devient plus grande, s'abaisse si la pression diminue.

Tant que la pression supportée par le liquide sera supérieure à la tension de sa vapeur, à la température qu'il possède, cette vapeur ne se formera que lentement; il y aura simplement *évaporation*. Mais si la température du liquide est telle, que la tension maximum de sa vapeur soit égale à la pression qu'il supporte, alors la vapeur se forme simultanément et tumultueusement dans la masse; il y a *ébullition*. On peut s'en convaincre en mettant de l'eau dans une cornue dont le col communique avec un récipient un peu grand, où l'on renferme de l'air sous une pression déterminée, moindre ou plus grande que la pression atmosphérique, et mesurée par un manomètre. On fait couler de l'eau froide sur le col de la cornue, pour condenser la vapeur au fur et à mesure qu'elle se forme et l'empêcher d'augmenter la pression dans l'appareil. Par une tubulure de la cornue passe un thermomètre engagé dans un bouchon, et dont le réservoir effleure la surface du liquide. On porte l'eau à l'ébullition et l'on note la température du thermomètre lorsque l'ébullition est bien établie. Si on mesure alors la pression donnée par le manomètre, et si l'on cherche ensuite, dans la table des forces élastiques maximum de la vapeur d'eau, la tension qui correspond à la température

de l'ébullition, on la trouve exactement égale à la pression que l'on vient de mesurer.

Donc la *température de l'ébullition est celle pour laquelle la tension maximum de la vapeur fournie est égale à la pression que supporte le liquide.*

On comprend très-bien qu'il ne peut se former, au sein du liquide, des bulles de vapeur, nécessairement *saturée*, si la pression est supérieure à la tension maximum de cette vapeur, car elles se condenseraient immédiatement.

Influence de la pression. — D'après le principe que nous venons de poser, on voit que si la pression diminue, comme la force élastique de la vapeur fournie par le liquide à l'ébullition est égale à cette pression, la température de l'ébullition devra elle-même s'abaisser.

Mettons sous le récipient de la machine pneumatique, de l'eau à 30°; pour que l'ébullition puisse avoir lieu, il suffira de réduire la pression à 31 millimètres; pour qu'elle ait lieu à 10°, il faudra amener la pression à n'être plus que de 9 millimètres. Et enfin si l'on voulait faire bouillir l'eau à 0°, il faudrait que le vide fût porté à $4^{mm},6$.

La vapeur formée ajoute sa force élastique à celle de l'air renfermé dans le récipient, et arrêterait promptement l'ébullition, si on cessait de faire marcher la machine de manière à enlever la vapeur au fur et à mesure qu'elle se forme. Pour obtenir l'ébullition à des températures voisines de zéro, il faudrait placer sous le récipient de la machine, à côté du vase qui contient l'eau, une substance avide d'humidité, comme de la chaux vive, ou plutôt de l'acide sulfurique (huile de vitriol), aussi concentré que possible.

Puisque, lorsque la pression diminue, l'ébullition se produit à plus basse température, sur les montagnes l'eau doit bouillir à une température d'autant moins élevée que la montage est plus haute. C'est ce qui a lieu en effet, comme l'indique le tableau suivant, où nous don-

nons la température moyenne d'ébullition sur quelques lieux élevés du globe.

Noms des localités.	Hauteur au-dessus de l'Océan.	Point d'ébullition.
Métairie d'Antisana........	4101m............	86°,3
Quito..............	2908	90 ,1
Hospice du Saint-Gothard..	2075	92 ,9
Bains du Mont-Dore.......	1040	96 ,5
Paris (observatoire 1er étage).	65	99 ,7
Niveau de l'Océan.........	0	100

A Paris la hauteur barométrique varie annuellement entre les deux limites extrêmes 0m,730 et 0m,770; la température d'ébullition varie alors entre 98°,8 et 100°,4. On voit d'après cela qu'on ne doit pas, lorsqu'on veut mettre une grande précision dans la construction d'un thermomètre, marquer 100° au point d'ébullition de l'eau, à moins que la pression atmosphérique ne soit exactement 760 millimètres. On pourrait, si la pression était voisine de la limite inférieure, commettre une erreur de plus d'un degré.

L'influence de la pression sur la température d'ébullition une fois bien établie, on peut en déduire une méthode propre à fournir la mesure des tensions maximum. Il suffit en effet pour cela de mettre une chaudière, contenant de l'eau, en communication avec un récipient renfermant de l'air dont l'élasticité, mesurée par un manomètre, peut être à volonté augmentée ou diminuée; et de déterminer au moyen de thermomètres très-exacts la température de la vapeur fournie par le liquide en ébullition. Cette température est précisément celle pour laquelle la vapeur a une tension maximum égale à la pression indiquée par le manomètre.

Il faut avoir soin de faire condenser la vapeur à mesure qu'elle se forme pour empêcher qu'elle n'ajoute sa propre force élastique à celle de l'atmosphère gazeuse qui presse sur le liquide. On y parvient en établissant la communication de la chaudière au manomètre par un tube montant qu'entoure un manchon traversé par un courant d'eau froide. De cette façon la vapeur condensée retourne sans cesse à l'état liquide à la chaudière.

C'est par cette méthode que M. Regnault a dressé la table

des forces élastiques que nous avons donnée dans le chapitre précédent.

Les différents liquides volatils ayant à une même température des tensions très-inégales, il en résulte que leurs températures d'ébullition à l'air libre, températures pour lesquelles la tension des vapeurs qu'ils fournissent devra être égale à la pression atmosphérique, seront aussi différentes. Ainsi sous la pression de $0^m,76$

L'eau bout à..................	100°
L'alcool......................	78°
L'éther.......................	37°
L'essence de térébenthine........	156°
Le mercure.....................	350°
L'acide sulfurique...............	325°

Marmite de Papin. — Si le liquide volatil est renfermé dans un vase complétement clos, alors l'ébullition sera indéfiniment retardée; c'est-à-dire que, à quelque température que l'on porte le vase, l'ébullition ne pourra point avoir lieu. Et cela doit être, puisque la vapeur reste au-dessus du liquide et maintient l'espace saturé à toutes les températures par lesquelles il passe. La *marmite de Papin*, connue aussi sous le nom de *digesteur*, remplit précisément ces conditions; on s'en sert pour porter l'eau à des températures plus élevées que 100°, et lui faire attaquer ou dissoudre des substances sur lesquelles elle n'agirait point dans les circonstances habituelles de son ébullition.

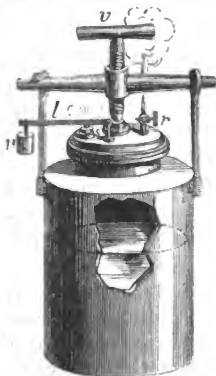


Fig. 130.

Cet appareil se compose d'un cylindre à fortes parois (fig. 130), fermé par un couvercle qui est maintenu par une vis de pression. Une soupape de sûreté est adaptée à ce couvercle, pour régler cette pression et empêcher les explosions. On peut, au commencement, chasser l'air par l'ouverture *r*.

La *marmite autoclave* (fig. 131) est un vase qui présente à sa paroi supérieure une ouverture elliptique. Cette ouverture se ferme par un couvercle intérieur maintenu par une vis qui agit, non plus en pressant comme dans la marmite de Papin, mais au contraire en soulevant le couvercle pour le faire appuyer de bas en haut sur les bords. Une soupape à poids garantit également contre les explosions. Cette soupape est d'autant plus nécessaire, que la vapeur, par la pression qu'elle exerce sur le couvercle, se ferme à elle-même la sortie.

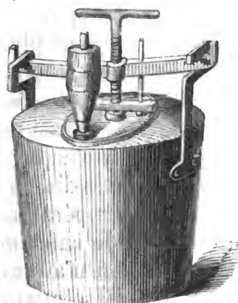


Fig. 131.

Il est une circonstance où l'ébullition en vase fermé est possible; c'est lorsque la portion de paroi qui forme la chambre de vapeur est refroidie en un de ses points de telle sorte que la température y soit moins élevée que celle du liquide. Prenons pour exemple un ballon en verre à long col, rempli d'eau à moitié; portons cette eau en pleine ébullition, de manière à chasser complétement l'air; fermons alors le col avec un bouchon de bon liége, et plongeons-le, renversé, dans une terrine pleine d'eau pour empêcher la rentrée de l'air; l'ébullition s'arrête rapidement; mais elle se reproduit dès l'instant où l'on condense la vapeur en mettant un corps froid en contact avec le fond du ballon. Ainsi, en faisant couler un filet d'eau fraîche sur le fond (fig. 132), on maintiendra l'ébullition. Si on interrompt l'écoulement, l'ébullition cesse au bout de quelque temps, parce que la paroi se réchauffe par le contact de la vapeur et surtout par sa condensa-



Fig. 132.

tion. Dès lors cette condensation ne peut plus se produire, et la pression se trouve rétablie.

Influence des substances dissoutes. — La présence de matières étrangères en dissolution dans l'eau a pour effet d'élever le point d'ébullition. Le retard apporté à l'ébullition par une substance donnée est d'autant plus grand, que la proportion de matière dissoute est plus considérable. Il varie d'ailleurs avec la nature de ces substances. Ainsi, en dissolvant 41 grammes de sel de cuisine dans 100 grammes d'eau pure, on amène le point d'ébullition à 108°. Avec 335 grammes de salpêtre dissous dans 100 grammes d'eau, on fait remonter la température d'ébullition à 116°. Enfin, avec du chlorure de calcium dans la proportion de 325 pour 100, l'ébullition n'a plus lieu qu'à 180°. La vapeur fournie par ces dissolutions est identique avec celle que donne l'eau pure elle-même.

Pour chacun de ces liquides, au moins lorsque l'eau est saturée, aussi bien que pour l'eau pure, le point d'ébullition est constant, parce que au fur et à mesure que l'eau s'évapore, la quantité de sel qu'elle tenait en dissolution retourne à l'état solide, de telle sorte que la dissolution reste au même point de saturation. Aussi les emploie-t-on pour faire des *bains-marie* ayant une température supérieure à 100°, et constante. Pour cela on plonge dans le liquide en ébullition le corps, ou le vase contenant le corps, que l'on veut maintenir à cette température fixe.

Remarquons aussi que puisque la dissolution saturée de sel marin bout à 108°, c'est seulement à cette température que la tension de la vapeur d'eau fournie par cette dissolution est égale à 760^{mm}; et que la dissolution de chlorure de calcium ne fournit de la vapeur d'eau ayant cette tension de 760^{mm} qu'à 180° seulement. Il suit de là qu'à température égale, l'eau pure, la dissolution de sel marin et la dissolution de chlorure de calcium fournissent de la vapeur d'eau avec des tensions très-différentes. La tension de la vapeur sera d'autant plus faible, à cette température, que le liquide qui la donne bout à une température plus élevée.

Influence de la matière du vase.—La nature du vase

qui renferme le liquide n'est pas sans influence sur la température d'ébullition. On a remarqué que l'eau bout à plus haute température dans un vase en verre que dans un vase en métal; la différence va bien à 1° ou 1°,5, suivant la nature du verre. Aussi n'est-il pas indifférent, pour marquer le point 100° du thermomètre, d'employer un ballon en verre ou une étuve de laiton; mais on a constaté que la vapeur fournie a sensiblement la même température dans les deux cas, et aussi la même tension. Rien ne prouve mieux l'influence de la matière solide en contact avec l'eau sur le point d'ébullition, que l'expérience suivante : on fait chauffer à côté l'un de l'autre deux petits ballons de verre plein d'eau, munis chacun d'un thermomètre, et quand ils arrivent tous les deux à 100°, on projette dans l'un des deux une pincée de limaille de fer ou de tournure de cuivre. Immédiatement l'ébullition s'établit dans ce ballon, tandis que l'eau du second reste calme et n'entre en ébullition qu'à environ 101°,25. On peut aussi, après avoir porté de l'eau à l'ébullition dans un ballon en verre, le retirer du feu, attendre que l'ébullition soit arrêtée, et jeter alors un peu de tournure de cuivre dans le ballon ; l'ébullition recommencera aussitôt.

Distillation.—L'eau des puits, des rivières, des mers, est loin d'être pure ; elle contient en dissolution une assez forte proportion de matières étrangères non volatiles. Lorsqu'on abandonne à l'air libre une certaine quantité de cette eau, elle s'évapore, et laisse comme résidu la totalité des matières dissoutes. En élevant la température, on activera l'évaporation. Si le vase où s'opère l'évaporation est fermé et mis en communication par sa partie supérieure avec un espace refroidi, alors, d'après le principe de Watt, l'eau ira se condenser dans cet espace froid à l'état de pureté complète. Cette opération qui est d'un usage continuel dans la science et dans l'industrie, est connue sous le nom de *distillation*. Elle s'applique non pas seulement à l'eau, mais à tous les liquides volatils, alcool, éther, essences, etc., mélangés à des substances fixes, ou beaucoup moins volatiles.

Lorsqu'on n'a à opérer que sur de petites quantités de liquides, voici comment on dispose son appareil. On établit sur un fourneau à feu nu, ou sur un bain-marie, sui-



Fig. 133.

vant la température nécessaire, une petite cornue contenant la matière à distiller (fig. 133). Le col incliné de cette cornue s'engage dans le col d'un ballon à deux tubulures.

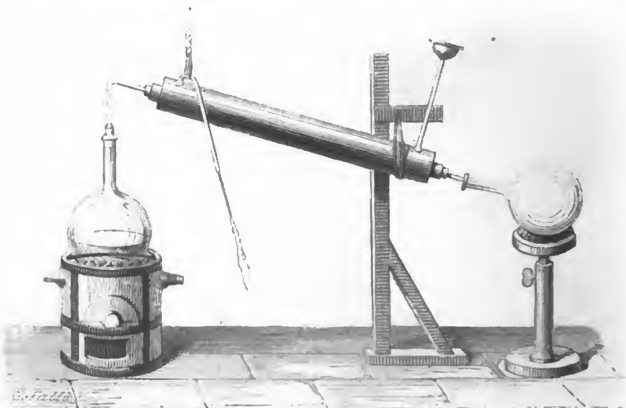


Fig. 134.

La seconde tubulure laisse sortir l'excédant de vapeur qui échappe à la condensation. Le ballon est plongé dans une terrine contenant de l'eau froide.

Lorsqu'on veut obtenir une condensation plus complète, on fait passer la vapeur, dans son trajet de l'appareil distillateur au récipient de condensation, dans un tube de verre incliné et enveloppé d'un cylindre ou *manchon* en laiton, au travers duquel on fait circuler un courant d'eau froide (fig. 134). L'eau entre par l'extrémité inférieure et ressort par l'extrémité supérieure du manchon.

Alambic.—Pour opérér en grand, on emploie l'*alambic* (fig. 135). Le vase distillatoire est une chaudière en métal

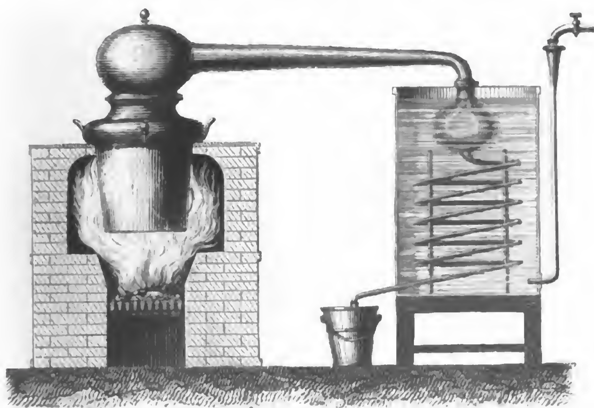


Fig. 135.

appelée *cucurbite*, d'une capacité souvent très-considérable. Elle est établie sur un fourneau en maçonnerie, et surmontée d'un couvercle voûté, appelée *chapiteau*, qui par un tuyau latéral, se rattache à un long tube replié en *serpentin* dans un vase plein d'eau froide, nommé *réfrigérant*. L'eau froide du réfrigérant est sans cesse renouvelée par un tube latéral qui débouche au fond. Elle repousse l'eau chaude, plus légère à la partie supérieure, où se trouve un petit tuyau de déversement ou *trop-plein* qui la porte au dehors. Si l'alambic était employé à distiller de l'eau, on ferait passer cette eau, déjà échauffée,

dans la chaudière, ce qui évidemment économiserait le combustible. Le serpentin a son ouverture au bas du réfrigérant; un vase placé au-dessous reçoit l'eau résultant de la condensation de la vapeur.

Chaleur latente. — Nous avons dit que pendant l'ébullition la température restait constante. Cette fixité de la température de l'ébullition s'explique de la même manière que la fixité de la température de fusion, en admettant qu'un kilogramme d'eau à l'état de vapeur exige, pour être à une température donnée, plus de chaleur qu'il ne lui en faut à l'état liquide à cette même température. La différence des deux sommes de calorique s'appelle chaleur *latente* de vaporisation. On l'appelle *latente* parce qu'on admet que cette quantité de chaleur ne remplit dans le corps gazéiforme qu'un rôle purement mécanique, et n'agit point sur le thermomètre. On considère ainsi la somme totale de chaleur possédée par le kilogramme de vapeur comme composée de deux parties : l'une (chaleur sensible) qui donne à la vapeur sa température, l'autre (chaleur latente) qui est insensible au thermomètre et a pour effet de maintenir annulée la cohésion et d'établir entre les particules la force répulsive qui caractérise les gaz.

Quel que soit le sens qu'on attribue d'ailleurs à ce mot de chaleur latente, il n'en faut pas moins reconnaître que la transformation en vapeur, à une certaine température, n'a lieu qu'à la condition que la source de chaleur fournira un excédant de calorique. Si la source fournit plus de chaleur qu'il n'en faut, toute la masse liquide se transformera *progressivement* en vapeur, et prendra de plus une certaine élévation de température. Si la source ne fournit pas la quantité de chaleur voulue, il y aura bien toujours évaporation progressive, mais en même temps la température du liquide et de la vapeur descendra à mesure qu'il y aura plus de vapeur produite.

Supposons qu'un poids de 100 grammes d'eau fournisse 60 grammes de vapeur; il restera 40 grammes d'eau liquide. Or, en admettant que la masse totale du liquide

fût dans le principe à 20°, 60 grammes de vapeur exigent plus de chaleur pour être à 20° que 60 grammes d'eau liquide. Donc la somme de chaleur possédée par les 100 grammes d'eau est insuffisante pour maintenir 40 grammes d'eau et 60 grammes de vapeur à 20°, mais elle sera suffisante pour les maintenir à une température plus basse. Aussi y aura-t-il refroidissement, et refroidissement progressif, parce que la vapeur ne se forme elle-même que progressivement.

Si le liquide volatil est en contact avec un corps, il faudra dans ce cas considérer la somme totale de chaleur possédée par le liquide et par le corps. Elle sera insuffisante pour leur conserver leur température primitive si une partie du liquide se vaporise; il y aura donc refroidissement simultané pour la vapeur, pour le liquide restant et pour le corps. C'est ce qui explique le froid produit par l'évaporation de l'éther, de l'alcool et même de l'eau mise sur le front. Et si les deux premiers liquides donnent une sensation de froid plus grande que l'eau, cela tient à ce que la tension et la densité de leur vapeur sont plus grandes que celles de la vapeur d'eau, et surtout à ce que leur évaporation est beaucoup plus rapide.

Les *alcarazas* sont des vases en terre poreuse qu'on remplit d'eau et qu'on suspend autant que possible dans un courant d'air. L'eau suinte lentement au travers des pores et se vaporise à la surface extérieure, refroidissant ainsi et le vase et le liquide qu'il contient.

Congélation de l'eau dans le vide.— Le refroidissement produit par l'évaporation peut être assez grand pour congeler le liquide. Il faut pour cela que le changement d'état ait lieu rapidement, pour ne point laisser au liquide le temps de se réchauffer sous l'influence des corps qui l'entourent. Mettons sur la platine de la machine pneumatique un vase en verre large et peu profond contenant de l'acide sulfurique concentré à 66° du pèse-acide de Baumé; disposons au-dessus une petite capsule excessivement mince en laiton ou en verre, dans laquelle nous

verserons une mince couche d'eau (fig. 136); puis recouvrons le tout avec la cloche et mettons en mouvement les pistons. La vapeur se formera dans ces conditions avec une très-grande rapidité, à cause de la raréfaction de l'air de l'absorption par l'acide de la vapeur déjà produite. Aussi verra-t-on assez promptement se former à la surface de l'eau des cristaux de glace.

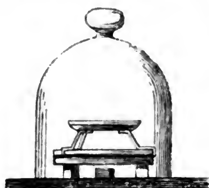


Fig. 136.

L'expérience de la congélation de l'eau réussit aussi très-bien avec le *cryophore* (fig. 137). C'est un tube contenant de l'eau dans sa partie A; il a été fermé en B; pendant que l'eau était en pleine ébullition, de telle sorte qu'il ne reste point d'air. Lorsqu'on enveloppe d'un mélange réfrigérant ou même simplement de glace la partie B, l'évaporation s'établit rapidement en A d'après le principe de Watt, et bientôt on voit apparaître dans cette partie A des aiguilles de glace.



Fig. 137.

Prenons maintenant le phénomène en sens inverse et supposons que la vapeur vienne se condenser sur un corps froid; elle devra nécessairement élever sa température. En effet, la somme de chaleur possédée par la vapeur et par le corps est plus grande que celle que devraient renfermer le corps et l'eau liquide à la température qu'avait le corps dans le principe; donc ils prendront tous les deux une température plus élevée, jusqu'à ce que cette température soit la même que celle que possède la vapeur à son arrivée; alors elle ne se condensera plus, et l'échauffement se trouvera limité.

La quantité de chaleur qu'abandonne un kilogramme de vapeur à 100° en devenant eau à 100° serait susceptible de porter de 0° à 100° environ 5 kilogrammes et demi d'eau. Aussi emploie-t-on fréquemment ce mode de chauffage. Ainsi, pour chauffer le sirop de sucre, on fait arriver

la vapeur dans un serpentin qui circule au milieu du liquide. Pour chauffer les bains de teinture, on fait arriver la vapeur dans le sein même du liquide. On comprend le motif qui détermine ces différences dans le mode d'emploi de la vapeur. Dans le premier cas on veut concentrer le sirop, c'est-à-dire chasser en partie l'eau qui tient le sucre en dissolution. Ce serait donc agir précisément contre le but de l'opération que de faire arriver de l'eau dans la liqueur. Dans le second cas le même inconvénient n'existe plus, et la vapeur est introduite dans le bain même.

Absorption. Tubes de sûreté. — Nous avons dit que

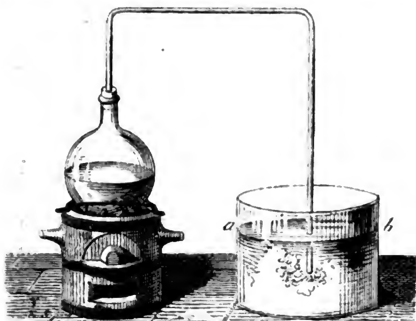


Fig. 138.

lorsqu'un espace fermé, contenant de la vapeur à saturation, se trouvait refroidi en un de ces points, la vapeur prenait tout à coup une tension plus faible, la tension maximum correspondante à la température du point froid.

Supposons donc un ballon contenant un liquide volatil porté à une température un peu élevée et envoyant, par un tube abducteur, cette vapeur au milieu d'une masse liquide où elle se condense (fig. 138). Tant que la température sera assez élevée pour que la tension de la vapeur soit supérieure à la pression atmosphérique, le niveau du liquide dans le tube sera refoulé au-dessous du niveau

dans le vase de condensation; mais si une cause quelconque, comme un courant d'air froid qui frapperait la surface du ballon, vient à abaisser la température de ce ballon, il en résultera une diminution de tension et par suite l'élévation du liquide dans le tube.

Pour fixer les idées, supposons de l'eau dans le ballon et dans le vase de condensation. La température de l'ébullition est 100°; la tension de la vapeur est par conséquent de 760mm. Admettons que la température du ballon et de l'eau qu'il contient baisse seulement de deux degrés. A 98°, la tension de la vapeur d'eau n'est plus que 707mm environ. C'est donc une diminution de tension équivalente à 53 millimètres de mercure, ou à 53mm × 13,5 millimètres d'eau=715mm. Ainsi l'eau pourra monter dans le tube à plus de 7 décimètres de hauteur. Le tube vertical est loin en général d'avoir cette dimension. Alors pour un simple abaissement de température de 2°, l'eau sera projetée dans le ballon.

Le même effet peut se produire avec un appareil à dégager les gaz ; seulement, comme la force élastique varie moins rapidement que la tension de la vapeur d'eau, il faudra pour produire le même effet un abaissement de température plus considérable. L'accident sera moins à craindre, à moins qu'il n'y ait un ralentissement dans le dégagement du gaz.

Ce phénomène, connu sous le nom d'*absorption*, peut avoir de graves inconvénients ; car il amène en contact avec les substances contenues dans le ballon un élément nouveau qui peut modifier singulièrement les réactions chimiques. De plus, le liquide arrive froid sur les parois chaudes du vase, et il les fera presque inévitablement casser. On a donc en chimie un grand intérêt à prévenir les absorptions. Voici les moyens, très-simples d'ailleurs, que l'on emploie.

Si les matières contenues dans le ballon producteur sont liquides, on adapte au bouchon qui porte le tube abducteur un second tube droit qui plonge dans le liquide (fig. 139). S'il y a diminution de tension dans le

ballon, en même temps que la pression atmosphérique fait monter le niveau du liquide de la cuve dans le tube abducteur, elle refoule le liquide du ballon dans le tube droit que porte le bouchon ; et l'air arrivera évidemment au bas de ce tube bien avant que l'eau soit montée au haut de la branche verticale du tube abducteur ; dès lors l'air rentrera dans le ballon et y rétablira la pression. Ce petit tube, qu'on appelle *tube de sûreté*, se retrouve encore dans l'appareil de Woulf (fig. 140) dont on fait usage pour préparer les dissolutions de gaz. Il s'adapte à la tubulure du milieu

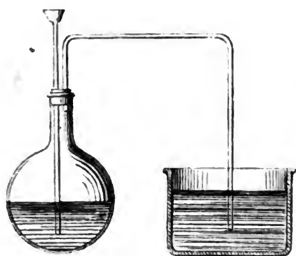


Fig. 139.

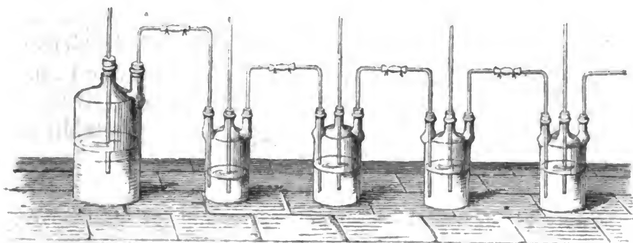
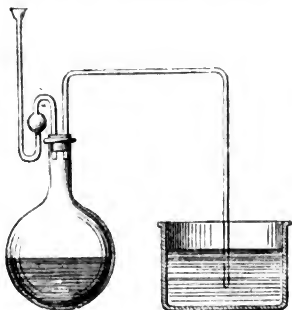


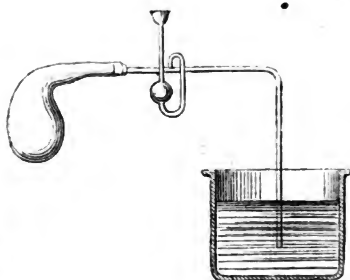
Fig. 140.

des flacons où s'opère la dissolution, et prévient une diminution de force élastique qui ferait remonter dans ce flacon la liqueur du flacon suivant.

On emploie aussi comme tubes de sûreté les tubes de Welter ou tubes en S, représentés dans les figures 141 et 142. Ce sont de véritables manomètres à air libre. La courbure inférieure de ces tubes est occupée par un liquide quelconque, eau ou acide. Tant que la pression intérieure est supérieure à la pression atmosphérique, le liquide se maintient élevé dans la branche

droite à une certaine hauteur; le diamètre assez considérable de la boule soufflée au milieu de la branche moyenne restreint dans les limites étroites les variations du niveau


Fig. 141.


Fig. 142.

dans cette branche, et empêche le gaz de repousser le liquide jusqu'au bas de la courbure et de s'échapper au dehors. Si une diminution de pression a lieu à l'intérieur de l'appareil, le niveau redescend dans la grande branche, et quand il arrive au bas de la courbure, il livre passage à l'air qui rentre dans l'appareil et y rétablit la pression.

Appareil Derosne.—Nous ne pouvons mieux terminer ce chapitre qu'en donnant le dessin et la description sommaire d'un appareil d'une haute importance industrielle, et où nous trouverons mis en pratique les différents principes que nous avons exposés dans ces deux dernières leçons; nous voulons parler de l'appareil à concentrer les sirops, de MM. Derosne et Caïl (fig. 143).

Il se compose d'une grande chaudière A, à double fond, contenant le sirop. Un tube amène la vapeur, fournie par un générateur, dans un serpentin horizontal, dont les replis offrent au milieu du liquide un développement considérable. La vapeur d'eau qui s'échappe du sirop est conduite par un gros tuyau B au condenseur C. Ce condenseur se compose de tubes horizontaux superposés et rajustés à leurs extrémités, de manière à former un serpentin. L'extrémité inférieure communique par le

tube K avec une pompe aspirante, qui enlève l'air et la vapeur condensée, et fonctionne par conséquent comme machine pneu-

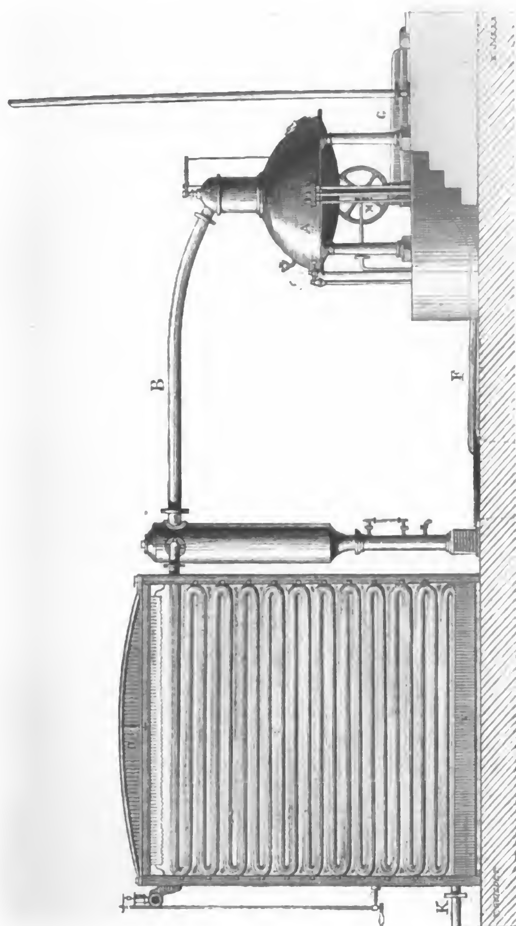


Fig. 143.

matique. Nous trouvons donc déjà là l'application du chauffage à la vapeur, du principe de Watt, des règles relatives à l'éva-

poration, de l'influence de la diminution de pression sur l'activité de l'évoporation et l'abaissement de la température d'ébullition. De plus, pour ménager le combustible et amener le sirop déjà chaud dans la chaudière, on le fait couler sur la surface du serpentin. Il est amené par des tuyaux dans un bassin D placé au-dessus de ce serpentin et coule tout le long des tubes; il prend part à l'échauffement résultant de la condensation des vapeurs à l'intérieur, et arrive dans le bassin inférieur E, déjà échauffé et en partie concentré. Il passe de là dans le réservoir F. Maintenant, quand la cuite est terminée, on ouvre le robinet à deux voies M, de manière à laisser écouler le sirop prêt à cristalliser dans les bassins G, où s'opérera la cristallisation. Puis, la chaudière étant vide, on tourne le robinet dans l'autre sens, de manière à établir la communication avec le réservoir F, et on suspend un instant le chauffage de la chaudière. Alors, la diminution de tension de la vapeur détermine l'absorption du liquide dans la chaudière. Comme nous le voyons, il n'est, pour ainsi dire, pas un seul des principes exposés précédemment, qui ne trouve dans ce remarquable appareil son application.

Mesure des quantités de chaleur. — Jusqu'à présent nous n'avons donné aucune idée des moyens de mesurer les quantités de chaleur nécessaire pour produire tel ou tel effet physique dans les corps, élévation de température avec dilatation, ou bien changement d'état sans élévation de température.

Les principes qui ont guidé les physiciens dans la mesure des quantités de chaleur sont les suivants.

Nous pourrons admettre d'abord comme évident que la quantité de chaleur nécessaire pour donner à une masse de deux kilogrammes de cuivre, une certaine élévation de température, est double de celle qu'il faudrait fournir à un kilog. seulement du même corps pour subir la même élévation de température; en un mot, que les quantités de chaleur qu'il faut fournir à des masses différentes d'un même corps, pour leur faire subir la même variation de température, sont proportionnelles à ces masses.

Maintenant nous ne pouvons pas admettre de même *a priori* que les quantités de chaleur qu'il faut fournir à une même masse d'un certain corps, pour lui faire subir des variations de température plus ou moins grandes, sont proportionnelles à ces variations de température. Car s'il faut pour élever un corps

de 0° à 10° une certaine somme de chaleur, rien ne nous peut assurer *a priori* qu'il faudra la même quantité de chaleur pour le porter de 10° à 20°. Il est même probable qu'il faudra une quantité de chaleur différente ; car le corps n'est plus à 10° ce qu'il était à zéro ; il a changé, tout au moins dans ses dimensions, dans sa densité. C'est donc à l'expérience à décider la question.

Or, si nous prenons un kilogramme d'eau à 0° et un kilogramme d'eau à 50°, et si nous les mélangeons ensemble, nous obtenons une masse de deux kilogrammes d'eau à 25°; l'un des deux kilogrammes d'eau a monté de 0° à 25°; l'autre a descendu de 50° à 25°; et évidemment ce que l'un a gagné en chaleur, l'autre l'a perdu. Ceci prouve donc qu'un kilogramme d'eau qui monte de 0° à 25°, exige précisément la quantité de chaleur que perd un kilogramme d'eau qui descend de 50° à 25°, et qui est la même que celle qu'il devrait prendre pour monter de 25° à 50°. Dès lors la loi de proportionnalité est établie, au moins dans ces limites de température. Cette restriction est nécessaire : car si l'on prenait un kilogramme de mercure à 0° et un kilogramme de mercure à 300°, on n'obtiendrait pas une masse à 150°; la température du mélange serait un peu supérieure à 150°, environ 153°. Cela montre que la même quantité de chaleur qui fait monter un kilogramme de mercure de 0° à 153°, ne le fait plus monter ensuite que de 153° à 300°, et non de 153° à 306°. Il faudrait donc, pour faire monter ce kilogramme de mercure, de 0° à 306°, plus du double de la quantité de chaleur nécessaire pour le porter de 0° à 153°. La loi de proportionnalité ne se soutient donc que dans des limites de températures plus ou moins restreintes.

Chaleurs spécifiques. — Unité de chaleur. — Maintenant une autre question se présente, et nous avons déjà, à l'avance, indiqué sa solution; faut-il, pour élever de 0° à 10°, par exemple, un kilogramme de chaque espèce de corps, la même quantité de chaleur ? J'ai déjà dit que l'expérience donnait une réponse négative. Voici comme on peut faire cette expérience si importante. Prenons un kilogramme de mercure à 100° et un kilogramme d'eau à 0°, et mélangeons-les ensemble, nous trouverons pour température du mélange, non pas 50°, mais seulement 3° environ. Ainsi, pour faire monter l'eau de 0° à 3°, il faut la quantité de chaleur qu'abandonne un poids égal de mercure qui descend de 100° à 3°; ou, ce qui revient au même, qu'exigerait ce poids de mercure pour monter de 3° à

100°. La même quantité de chaleur qui fait monter la température d'un kilogramme de mercure de 97°, ne fait monter celle d'un kilogramme d'eau que de 3°; si donc on voulait faire monter l'eau et le mercure pris sous le même poids du même nombre de degrés, il faudrait fournir à l'eau $\frac{97}{3}$, ou 32 fois environ, autant de chaleur qu'au mercure.

Ainsi, la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température de l'unité de poids d'un corps, varie avec la nature de ce corps. On l'appelle sa *chaleur spécifique*. Ces quantités de chaleur se mesurent par comparaison comme toutes les quantités possibles, et l'unité adoptée est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° la température d'un kilogramme d'eau. C'est là ce que l'on appelle *unité de chaleur* ou *calorie*.

Représentons par A la chaleur spécifique d'un corps quelconque, du cuivre, par exemple, c'est-à-dire la quantité d'unités de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1°, ou plus généralement d'un degré (puisque nous admettons la loi de proportionnalité), la température d'un kilogramme de cuivre. Pour élever d'un degré la température de N kilogrammes, il faudra NA unités de chaleur, et pour la faire monter de $t°$ à T°, c'est-à-dire pour élever la température de $T-t$ degrés, il faudra N. A. $(T-t)$ unités de chaleur. Cette expression représenterait aussi évidemment la quantité de chaleur abandonnée par N kilogrammes de cuivre, qui descendraient de T° à $t°$.

S'il s'agissait de l'eau au lieu du cuivre, A, serait l'unité de chaleur, et alors l'expression se réduirait à N. $(T-t)$.

Supposons d'après cela une masse d'eau de M kilogrammes à la température t, et une masse d'un corps quelconque N à la température T, soit θ la température du mélange, A la chaleur spécifique du corps en question : la variation de température sera : pour l'eau, $\theta-t$ degrés; pour le corps, $T-\theta$ degrés; la quantité de chaleur gagnée par l'eau est $M(\theta-t)$; celle qu'a perdue le corps est $N.A\ (T-\theta)$. Ces deux quantités de chaleur sont égales. — D'où

$$M\times(\theta-t)=N\times A\times(T-\theta).$$

C'est là ce qu'on appelle l'équation des mélanges.

Elle permet 1°, connaissant par des déterminations expérimentales faites avec la balance et le thermomètre, M, N, T, t, θ, de calculer A la chaleur spécifique; 2° connaissant A, N, M, t,

θ, de déterminer T ; elle devient ainsi une méthode thermométrique.

Nous nous bornerons à donner ici les chaleurs spécifiques de quelques corps solides et liquides, déterminées, d'après cette méthode, par M. Regnault.

Verre	0,197
Fer	0,113
Zinc, Cuivre	0,095
Argent	0,057
Plomb	0,031
Platine, Or	0,032
Étain	0,056
Laiton	0,094
Soufre	0,202
Mercure	0,033
Fonte	0,130
Charbon	0,241
Essence de térébenthine	0,426
Alcool (M. Despretz)	0,622

Cette méthode peut évidemment aussi s'appliquer à la mesure des chaleurs latentes, soit de fusion, soit de vaporisation. Nous en donnerons quelques exemples commentés à la fin du volume.

CHAPITRE XV.

ÉLECTRICITÉ. — MACHINE ÉLECTRIQUE ÉLECTROPHORE.

L'*ambre jaune* ou *succin* acquiert par le frottement sur du drap bien sec la propriété curieuse d'attirer à lui les corps légers, tels que de petits morceaux de papier, des barbes de plume, etc. Ce phénomène, observé depuis bien longtemps, puisqu'on le trouve énoncé d'une manière très-positive par Thalès, 600 ans avant Jésus-Christ, a été, jusqu'au XVIIe siècle, le seul phénomène électrique connu. Le nom d'électricité, par lequel on désigne la cause de ce fait singulier, et aussi l'ensemble des phénomènes rapportés à l'action de cette même cause, a précisément pour étymologie le nom grec de l'ambre ἤλεκτρον.

Dans les premières années du XVIIe siècle, Gilbert, médecin de la reine Élisabeth, étendit considérablement le catalogue des corps susceptibles, comme l'ambre, de s'électriser, c'est-à-dire d'exercer, après le frottement avec du drap, de la soie, du taffetas, une action attractive sur les corps légers. Il reconnut cette propriété dans le verre, la résine, le soufre, le taffetas, etc., et constata en même temps que les métaux, tenus à la main, ne s'électrisent point par le frottement.

Conductibilité électrique. — Une découverte nouvelle, faite près d'un siècle plus tard par le physicien anglais Grey, donna l'explication de cette impuissance apparente des métaux à prendre les caractères électriques. En multipliant sous toutes les formes les expériences, il reconnut qu'un tube de verre s'électrisait comme une tige pleine; mais ce qui le frappa, ce fut de voir que le bouchon avec lequel il avait fermé l'extrémité du tube,

attirait aussi les corps légers, quoiqu'il eût été rangé parmi les corps *anélectriques*, c'est-à-dire qui ne prennent point l'électricité par le frottement. Le fait observé par Grey ne se manifestait d'ailleurs que lorsqu'il frottait la partie du tube de verre en contact avec le liége. Quand il frottait l'autre extrémité du tube, le liége n'était point électrisé.

Il planta alors dans le bouchon une tige métallique et la vit acquérir, comme le bouchon, les caractères électriques, et en même temps que lui. Enfin il attacha à cette tige une chaîne de laiton terminée par une boule, et, montant sur sa terrasse, il constata que l'extrémité de cette chaîne qui pendait jusqu'au sol, sans le toucher cependant, attirait aussi les pailles. Dès lors il substitua à la classification de Gilbert une classification nouvelle; il partagea les corps en deux classes : d'une part les corps qui transmettent l'électricité d'un point à un autre de leur masse, et qu'il appela *corps conducteurs*, de l'autre, ceux qui conservent l'électricité au point où elle a été directement développée, sans la transmettre à d'autres, et qu'il appela *corps non conducteurs*. Cette modification ne changea rien d'ailleurs au classement même des corps. Grey reconnut en effet que tous les corps que Gilbert regardait comme anélectriques étaient conducteurs, les métaux, les bois, l'eau, le corps humain, la terre, etc., et que tous les corps électrisables par le frottement étaient mauvais conducteurs.

Cette coïncidence n'est pas fortuite; elle s'explique facilement. Lorsqu'on tient à la main un morceau de métal et qu'on le frotte avec du drap, il s'électrise en réalité; mais l'électricité que le frottement a développée se répand sur la surface du métal, sur la main, sur le corps de l'observateur, sur la terre tout entière, et dès lors il n'en reste plus sur le métal qu'une quantité tout à fait inappréciable. Le contraire arrive avec le verre ou la résine qui conservent l'électricité et ne la transmettent point. Et si dans l'expérience de Grey le bouchon et la tige métallique se trouvaient électrisés, c'est parce que l'électri-

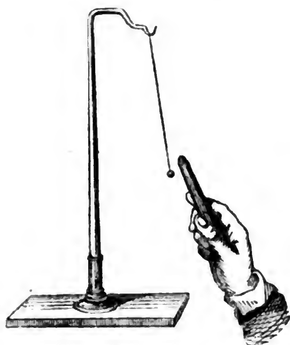
cité développée sur eux par le frottement, ou même empruntée aux points du verre en contact avec le liége, se trouvait *isolée* par le verre, qui ne conduit pas l'électricité et ne pouvait plus se perdre dans le sol. Et ce qui le prouve bien, c'est que, si la surface du verre est quelque peu humide, ce qui la rend conductrice, alors toute électricité disparaît : aussi est-il essentiel, pour faire réussir les expériences d'électricité, de s'assurer que toutes les pièces en verre qui séparent du sol les appareils soit parfaitement sèches ; il les faut chauffer, essuyer doucement avec une flanelle bien sèche ou du papier à filtre sec : sans cela l'électricité développée se perd par la couche d'humidité adhérente au verre. On peut prévenir cet inconvénient en recouvrant le verre d'une couche de vernis à la gomme laque. Cette substance isole mieux encore que le verre, et n'attire pas comme lui l'humidité.

Tous les corps sans exception sont donc électrisables par le frottement. Les corps mauvais conducteurs conservent l'électricité aux points mêmes où elle a été développée. Les corps conducteurs la transmettent à tous les points de leur surface, aux corps conducteurs comme eux qui les touchent, à la terre s'ils sont en communication avec elle par un corps conducteur. Ils la conservent au contraire s'ils sont portés par un support mauvais conducteur qui les isole du sol : de là le nom de corps *isolants* donné aux mauvais conducteurs, et aussi le nom de *réservoir commun* d'électricité donné à la terre.

Distinction des deux électricités. — Cinq ou six ans après les expériences de Grey, que nous venons de citer, un physicien français, Dufay, démontra que l'électricité développée sur les corps par le frottement n'est pas toujours la même, et qu'il existe deux espèces distinctes d'électricité. Voici comment il l'établit :

Il suspendit à un fil de cocon une balle de sureau, et attacha ce fil à un support en verre (fig. 144). Ce petit instrument appelé *pendule électrique* est d'un usage fréquent; il est, par sa grande mobilité, particulièrement propre à déceler la présence de l'électricité dans les

corps, et aussi la nature de cette électricité, comme les expériences que nous rapportons vont nous le prouver.


Fig. 144.

Dufay électrisa ensuite par le frottement sur de la laine un bâton de verre qu'il présenta au pendule. La petite balle de sureau fut attirée, et cette attraction se manifesta tant que le bâton de verre resta à une distance assez grande pour qu'il ne pût y avoir contact. Mais à partir du moment où, la distance étant diminuée, la balle de sureau eut touché le bâton de verre, celui-ci, présenté de nouveau à la balle, la repoussa fortement au lieu de l'attirer. Dufay prit alors un bâton de résine ou de cire d'Espagne, et le frotta de même avec du drap, puis il le présenta à la balle de sureau que repoussait le verre, et il reconnut qu'il attirait cette balle. Ainsi, la balle de sureau, repoussée par l'électricité du verre, est attirée par l'électricité de la résine. L'expérience peut être recommencée en procédant dans l'ordre inverse. Ainsi on présente à un pendule électrique le bâton de résine frotté; la balle est attirée jusqu'à ce qu'elle ait touché la résine. Si maintenant on présente alternativement à la balle le bâton de résine et le verre, on constate qu'elle est repoussée par le premier, attirée par le second.

Il est donc évident que l'électricité déposée sur le verre par le frottement avec du drap, et l'électricité développée de la même manière sur la résine sont douées de propriétés tout opposées, puisque l'une attire, tandis que l'autre repousse la même balle de sureau, électrisée par le contact de l'un ou de l'autre de ces deux corps.

Ajoutons que si l'on prend deux pendules électrisés, le premier, par le contact avec le bâton de verre, le second,

par le contact avec la résine, nous constaterons qu'un corps *quelconque*, électrisé et présenté successivement à ces deux pendules, ou bien attire le premier pendule et repousse le second, comme le ferait le bâton de résine, ou bien repousse le premier et attire le second, comme le ferait le bâton de verre. Donc il existe deux espèces d'électricité, et seulement deux. On les a appelées d'abord *électricité vitrée*, *électricité résineuse*, puis on a remplacé ces noms par ceux d'*électricité positive*, *électricité négative*. Ces mots *vitrée*, *résineuse*, semblent en effet indiquer que le verre frotté prend toujours la même espèce d'électricité; la résine, toujours l'électricité contraire. Ce qui est complétement faux, car le verre s'électrise différemment, suivant qu'on le frotte avec du drap ou avec une peau de chat.

Lorsque deux corps sont frottés l'un sur l'autre, ils prennent, l'un l'électricité positive, l'autre l'électricité négative, comme on peut s'en convaincre en les tenant isolés avec des manches de verre pendant le frottement et les présentant l'un après l'autre à un même pendule, mis à l'avance en contact avec un bâton de verre frotté. L'un des corps repousse, et l'autre attire la balle de sureau.

En outre si l'on prend deux petits pendules électrisés par leur contact avec un même bâton de verre électrisé lui-même par frottement, on constate, en les présentant l'un à l'autre, que leurs petites balles se repoussent mutuellement, et que les fils qui les portent s'écartent.

Si l'on prend au contraire deux pendules électrisés, l'un par le contact du verre, l'autre par le contact de la résine, on constate que les petites balles s'attirent, et que les fils se rapprochent par la partie inférieure.

Pour expliquer ces divers résultats d'expérience on admet l'existence de deux espèces d'électricité que l'on désigne sous les noms de *fluide positif* et de *fluide négatif*, exprimant par ce nom de fluide la faculté qu'a l'électricité de s'écouler d'un corps sur un autre et de se répandre sur tous les points d'un conducteur. Chacun de ces

fluides agit par répulsion sur ses propres molécules, et par attraction sur les molécules de l'autre fluide; ce que l'on exprime en disant que les fluides de même nom se repoussent, que les fluides de nom contraire s'attirent.

On admet que dans un corps non électrisé les deux fluides existent simultanément, en quantité indéfinie, et se neutralisent; que le frottement a pour effet de les séparer, en portant l'un des deux fluides sur le corps frottant, l'autre fluide sur le corps frotté.

Mode de distribution de l'électricité. — Dans les corps conducteurs l'électricité positive ou négative se porte

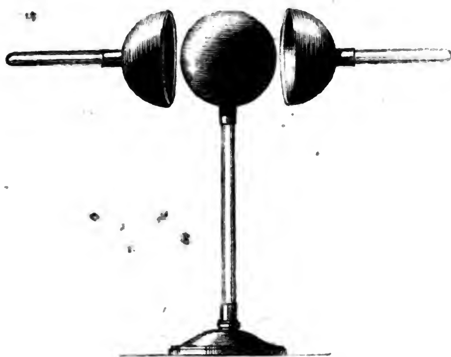


Fig. 145.

à la surface; c'est une conséquence naturelle de la répulsion mutuelle des parties d'un même fluide. Voici au surplus comment on le démontre. On prend un globe de métal porté sur un pied de verre bien isolant, et l'on dépose sur le globe de l'électricité positive empruntée au conducteur de la machine électrique dont nous parlerons tout à l'heure (fig. 145). On commence par s'assurer qu'un pendule à balle de sureau mis aussi en contact avec le conducteur, et présenté ensuite à la sphère, est repoussé par elle. On applique alors sur la surface de cette sphère deux calottes hémisphériques tenues avec

des manches isolants. Si on les retire après un contact très-court, on constate, à l'aide du pendule, qu'elles sont électrisées positivement, et que la sphère ne l'est plus. Ainsi, dès l'instant où la surface de la sphère a cessé d'être réellement la surface extérieure, l'électricité l'a quittée pour se porter sur les calottes qui forment alors cette surface extérieure.

Dans un corps mauvais conducteur l'électricité reste au point où elle a été déposée.

L'électricité, déposée sur un corps conducteur, abandonnant ainsi toujours la masse interne pour se porter à la surface, on peut se demander pourquoi elle ne quitte pas le corps lui-même pour se répandre au dehors. C'est bien en effet ce qui arriverait si le corps électrisé était dans le vide. Il perdrait son électricité, comme nous le dirons un peu plus loin en parlant de la lumière électrique. Mais dans l'air la pression atmosphérique, ou plutôt le défaut de conductibilité de l'air la retient fixée à la surface; à moins que l'air ne soit notablement humide, alors l'électricité s'échappe rapidement. Puisque l'air oppose un obstacle au fluide, le fluide doit presser sur l'air d'autant plus que l'épaisseur de la couche électrique est plus grande. Cette pression est ce que l'on appelle la *tension électrique*. Coulomb a donné les moyens de la mesurer. Il a reconnu que sur une sphère la tension est la même en tous les points; que pour un corps, autre qu'une sphère, la tension est d'autant plus forte en un point, que la courbure y est plus prononcée. Il résulte de là que toutes les fois qu'un corps conducteur présente des parties anguleuses ou des pointes, l'électricité se perd par ces pointes et s'écoule dans l'air. Nous verrons à la fin de ce chapitre l'heureuse application qu'on a faite de cette propriété des pointes pour détourner des édifices les dangers de la foudre.

Électricité par influence. — L'électricité peut se développer à distance sur les corps conducteurs lorsqu'ils sont mis en présence d'un corps électrisé. Pour le démontrer, prenons un cylindre en laiton porté sur un pied

de verre et muni à ses deux extrémités de petits pendules à balle de sureau. Ici les tiges des pendules sont en métal, et le fil qui porte la balle est un fil conducteur de lin, la balle n'ayant pas besoin d'être isolée du cylindre (fig. 146).

Le cylindre est mis en présence du conducteur de la machine électrique, muni également d'un pendule. On tourne le plateau de verre, et l'on voit alors les trois pendules *a*, *b*, *c* s'écarter de la verticale et prendre les positions *a'*, *b'*, *c'*. Un petit pendule fixé au milieu *d* du

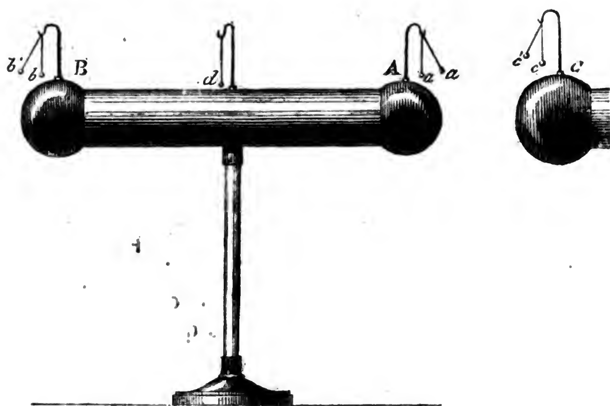


Fig. 146

cylindre AB reste au contraire vertical. Ainsi, dès l'instant où le conducteur C de la machine devient électrique, les extrémités A et B du cylindre manifestent leur électrisation par la répulsion qu'elles exercent sur leur petit pendule, qui s'électrise en même temps qu'elles par communication directe. La région moyenne n'est point électrisée, puisque le pendule *d* ne bouge point. Il reste à constater la nature de ces électricités. Prenons donc un bâton de verre électrisé positivement par son frottement sur du drap et présentons-le successivement aux pendules *c'*, *a'* et *b'* ; *c'* est repoussé, *a'* attiré, *b'* repoussé. Donc le conducteur C

est électrisé positivement, l'extrémité A négativement, et l'extrémité la plus éloignée B positivement.

Nous nous rendrons facilement compte de cet état d'électrisation du cylindre AB, appelé électrisation par *influence*. Ce cylindre renfermait les deux fluides. Dès l'instant où C s'est trouvé électrisé positivement, il a repoussé le fluide positif de AB, qui, glissant sur la surface conductrice, s'est porté au point B le plus éloigné; en même temps le fluide de nom contraire, attiré par C, s'est porté au point le plus rapproché A, la région moyenne restant à l'état neutre.

Si l'on éloigne le conducteur C, ou si on le décharge en le touchant avec la main, l'action d'influence cesse immédiatement, et les pendules *a* et *b* redeviennent verticaux. Mais si, laissant C en place et électrisé, on vient à toucher AB avec la main en un point quelconque, le pendule *b* retombe à la verticale et le pendule *a* se maintient élevé. On comprend que cet effet est dû à ce que le fluide positif repoussé par le conducteur C s'écoule dans le sol, tandis que le fluide attiré est maintenu à l'extrémité A.

Machine électrique. — L'exposition de ces faits était nécessaire pour bien comprendre la théorie de la machine électrique dont nous allons maintenant donner la description. Elle se compose de deux parties bien distinctes : la source d'électricité et un conducteur électrisé par influence (fig. 147).

Entre deux montants verticaux en bois tourne un plateau en verre monté sur un axe dont les extrémités sont portées par les montants. Cet axe est mis en mouvement par une manivelle. A ces mêmes montants sont adaptées deux paires de coussins, l'une en haut, l'autre en bas. Les coussins d'une même paire pressent entre eux le plateau, qui s'électrise alors par le frottement. Ils sont formés de plaques en bois recouvertes de feuilles de taffetas que l'on a enduites d'un amalgame de mercure, étain, zinc et bismuth. On employait autrefois des coussins en cuir rembourrés de crin et couverts d'une couche d'or

mussif (bisulfure d'étain); la disposition actuelle est préférable. Le verre s'électrise ainsi positivement et les coussins négativement.

Le conducteur se compose de deux gros cylindres horizontaux à surfaces arrondies, montés parallèlement

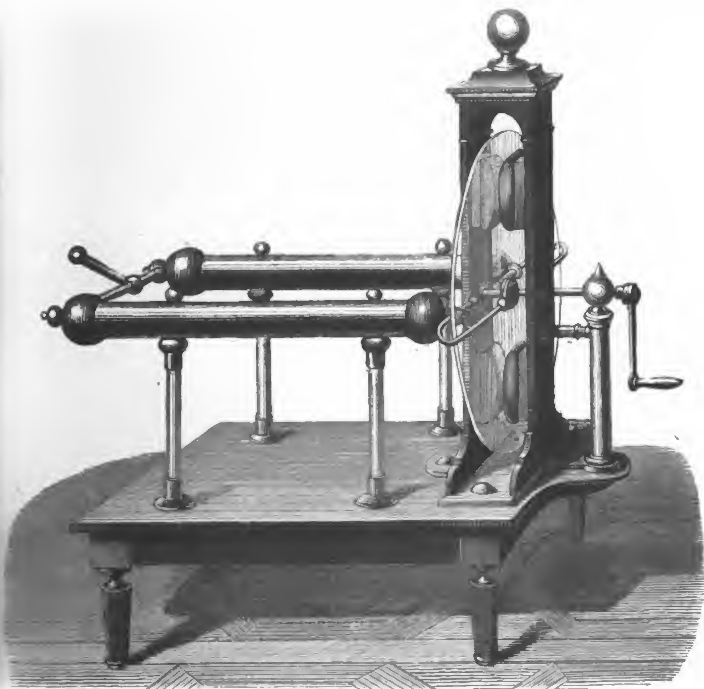


Fig. 147.

l'un à l'autre sur des pieds en verre et perpendiculairement au plateau. Les extrémités voisines de ce plateau portent deux arcs métalliques ou mâchoires en forme d'U, qui embrassent le plateau de verre jusqu'à moitié environ de son rayon sans le toucher. Ces mâchoires portent des pointes tournées vers les surfaces du plateau. Les extré-

mités les plus éloignées sont rattachées l'une à l'autre par un conducteur transversal. Un petit pendule électrique est fixé à l'une de ces dernières extrémités, et mesure, par sa déviation de la verticale, la charge du conducteur.

Le plateau de verre étant électrisé positivement par son frottement sur les coussins, décompose par influence le fluide neutre des conducteurs, repousse le fluide positif qui se maintient sur la surface dans les parties éloignées, attire, au contraire, le fluide négatif, qui, arrivant aux mâchoires, se perd par les pointes dans l'air. Ce fluide négatif va, il est vrai, neutraliser le fluide positif du verre, mais le frottement répare les pertes du plateau.

Pour empêcher l'électricité de se perdre par le contact de l'air, dans le trajet des coussins aux mâchoires, on enveloppe deux des quadrans des plateaux d'une double feuille de taffetas maintenue par un cadre à un centimètre environ du verre. Le taffetas, étant un corps mauvais conducteur, prévient la déperdition de l'électricité.

La machine électrique a été inventée par *Otto de Guéricke*, auquel nous devons aussi la machine pneumatique. Elle a reçu, depuis son invention, bien des perfectionnements, et celle que nous venons de décrire est due à Ramsden.

Son conducteur étant chargé de fluide positif, on voit que lorsqu'on voudra déposer du fluide positif sur un conducteur isolé, il suffira de le mettre en contact avec le conducteur de la machine. Si l'on voulait, au contraire, électriser ce corps négativement, il faudrait le tenir à petite distance de la machine, en le touchant avec le doigt. Alors il y aurait, comme nous l'avons exposé plus haut, électrisation par influence; le fluide positif serait refoulé dans le sol, et le fluide négatif maintenu par attraction sur le corps. En retirant alors le doigt, on laisserait sur le corps l'électricité négative seule.

Machine de Nairne (fig. 148). — On construit aussi des machines qui donnent simultanément et sur des con-

ducteurs distincts les deux électricités; nous citerons la machine de Nairne.

Dans cette machine, le plateau est remplacé par un cylindre en verre de grand diamètre, fermé par deux calottes hémisphériques ; un axe qui traverse le cylindre dans sa longueur et qui est porté par deux montants isolants, est mis en mouvement à l'aide d'une manivelle. Deux cylindres de laiton sont montés sur des pieds de verre parallèlement à l'axe de rotation, et à la hauteur de cet axe. L'un porte un grand coussin, recouvert d'amalgame, qui servira de frottoir. Celui-là prendra directement au coussin l'électricité négative. L'autre ne touche

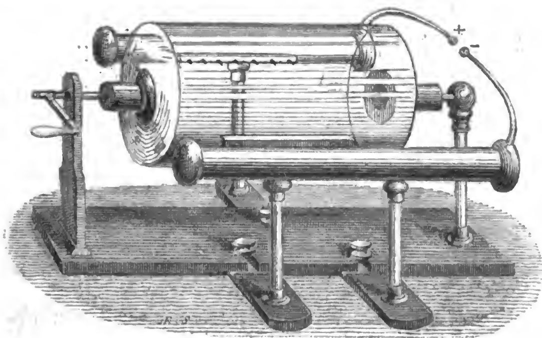


Fig. 148.

point le globe de verre, mais il lui présente une série de pointes. Il représente donc le conducteur de la machine ordinaire et s'électrise positivement par influence.

Effets de l'électricité de tension. — Les effets produits par la machine électrique sont très-remarquables et très-variés. Nous nous bornerons à citer les expériences les plus simples et les plus frappantes.

Tout le monde sait que lorsque l'on approche la main de la machine électrique chargée, on voit une étincelle brillante jaillir entre la main et le conducteur. Cette étincelle indique toujours la combinaison à travers l'air des deux électricités positive et négative. L'électricité positive

est sur le conducteur ; quant à la négative, elle vient de la main dont le fluide neutre est décomposé par influence, le fluide positif repoussé dans les pieds si le corps est isolé sur un tabouret à pied en verre, dans la terre si le corps n'est point isolé, et le fluide négatif attiré dans la partie de la main la plus voisine du conducteur. L'étincelle ne jaillit que quand la distance est assez petite et la tension électrique assez grande pour vaincre la résistance de l'air. Le petit bruit qui accompagne l'étincelle est dû à l'ébranlement causé dans l'air par le mouvement des fluides électriques. Quant à sa forme sinueuse et brisée, on n'en a pas donné jusqu'à présent d'explication satisfaisânte. Il est probable cependant qu'elle est due à l'hétérogénéité de l'air qui rend la conductibilité électrique très-irrégulière et peut-être aussi aûx particules solides que l'air tient en suspension, et qui forment alors un conducteur discontinu.

Si une personne placée sur un tabouret à pieds de verre met sa main sur la machine pendant qu'on fait tourner le plateau, elle fait alors partie du conducteur de la machine, et lorsqu'une autre personne approchera la main du corps de la première, elle en tirera une étincelle, tout aussi bien qu'elle en tirerait une du conducteur.

La sensation produite par l'étincelle est à peu près la même pour les deux personnes. Si l'étincelle est fournie par une machine fortement chargée, elle produit une secousse, une commotion dans les articulations des phalanges et du poignet, ou même du coude. Si la machine est faible ou si l'étincelle est tirée avec le bout du doigt, la sensation est plutôt celle d'une piqûre. L'observateur faisant partie du conducteur n'éprouve guère que cette dernière sensation ; mais il sent en même temps ses cheveux se dresser sur sa tête, et comme un vent frais passer sur sa figure. L'effet est particulièrement marqué au moment où l'on tire l'étincelle.

Si l'on visse une pointe sur le conducteur de la machine, alors ces phénomènes disparaissent à peu près complétement. Ils disparaissent aussi, si, au lieu de met-

tre la pointe sur le conducteur, on la lui présente à petite distance. Dans le premier cas, l'électricité positive du conducteur se perd par la pointe; dans le second cas, c'est l'électricité négative du corps qui porte la pointe, qui va neutraliser le fluide positif du conducteur.

Si l'on place au-dessous du conducteur un plateau métallique en communication avec le sol, et sur lequel on a mis de petites balles ou de petites figures en moelle de sureau, on les voit se précipiter sur le conducteur, puis, repoussées par lui dès qu'elles l'ont touché, retomber sur le plateau, s'y dépouiller de l'électricité que leur avait donnée le conducteur, alors sauter de nouveau vers le

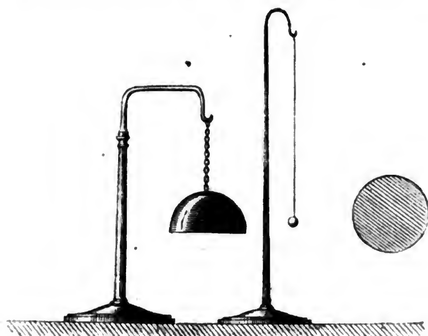


Fig. 149.

conducteur, et ainsi de suite. C'est ce que l'on nomme la *danse des pantins*. Nous renverrons à des traités de physique plus complets pour lire la théorie ingénieuse, sinon exacte, que Volta a donnée du phénomène de la grêle, théorie qui a pour point de départ cette expérience de la danse des pantins.

Si l'on dispose un timbre métallique, en communication avec le sol, à côté du conducteur, et si l'on suspend une petite balle de cuivre par un fil entre le conducteur et le timbre (fig. 149), le même mouvement de va-et-vient se manifestera, et la boule fera vibrer le timbre. On emploie encore, pour faire cette expérience, le *carillon*

de Franklin (fig. 150). Un crochet passé sur le conducteur de la machine porte trois timbres ; les deux timbres des extrémités sont suspendus par des fils métalliques et celui du milieu par un fil de soie, mais une petite chaîne métallique le fait par dessous communiquer avec le sol. Deux petites balles sont suspendues entre les trois timbres et oscillent, du timbre de droite ou de gauche, au timbre du milieu, en les faisant vibrer, et donnant à chaque contact une étincelle. Quelquefois, au lieu de suspendre le carillon à la machine électrique, on le dispose au-dessous, en armant alors son crochet d'une pointe qui laisse perdre le fluide négatif développé par influence, tandis que le fluide positif se porte dans les timbres et met les balles en mouvement.



Fig. 150.

Lorsque la machine électrique est établie dans une salle complétement obscure, l'étincelle présente alors un éclat remarquable. Ce qui frappe le plus, c'est surtout son instantanéité, qui est telle, que les corps animés du mouvement le plus rapide nous paraissent immobiles quand ils sont éclairés par l'étincelle. Une des plus jolies expériences qu'on puisse faire avec la lumière électrique est celle des carreaux étincelants. On colle sur une lame de verre un petit ruban étroit en étain replié en zigzag; puis avec la pointe d'un canif on rompt la continuité du ruban, de telle sorte que l'ensemble des points découpés représente un dessin quelconque, une lettre de l'alphabet, par exemple. Si, touchant avec la main l'une des extrémités du ruban, on présente l'autre extrémité à la machine, le carreau se trouve instantanément illuminé par les étincelles qui jaillissent simultanément à toutes les solutions de continuité, et le dessin apparaît nette-

ment. Le carreau pourrait ne communiquer à la machine que par l'intermédiaire d'un fil conducteur assez long; de sorte que, la machine étant dans une salle, le carreau pourrait être dans une autre. Franklin avait même tenté d'établir, par ce moyen, une correspondance à l'aide de l'électricité.

Si on place une pointe sur la machine à l'extrémité du conducteur la plus éloignée du plateau, on voit alors dans l'obscurité l'électricité se perdre dans l'air en formant au bout de la pointe une aigrette brillante d'une couleur violacée.

Pour montrer comment l'électricité se perd dans le vide, on prend un ballon de forme ovoïde présentant deux garnitures métalliques aux extrémités de l'axe de l'œuf. Ces garnitures portent des tiges terminées par des boules qui se trouvent placées à peu près au centre du ballon et à quelques centimètres l'une de l'autre. L'une des garnitures porte un robinet que l'on visse sur la machine pneumatique pour faire le vide à l'intérieur. Si l'on fait alors communiquer la garniture supérieure avec le conducteur de la machine, et si l'on fait tourner le plateau, on voit toute la capacité du ballon éclairée par l'électricité qui s'échappe de la boule positive. La boule négative est couronnée d'une petite auréole. Au fur et à mesure qu'on laisse rentrer l'air dans l'œuf électrique, l'aigrette positive se resserre de plus en plus, et finit par se réduire à l'étincelle ordinaire qui ne jaillit même entre les boules qu'autant qu'elles sont suffisamment rapprochées.

L'étincelle électrique fournie par la machine enflamme les corps combustibles. Ainsi, quand on dispose sur le conducteur, ou sur une plaque de métal, rattachée par une chaîne au conducteur, un vase de laiton rempli d'éther, si on approche le doigt, ou une petite tige métallique terminée par une boule, de la surface du liquide, de manière à en tirer l'étincelle, l'éther s'enflamme immédiatement.

L'étincelle électrique est un agent chimique puissant;

elle détermine des combinaisons et des décompositions; elle agit surtout sur les substances gazeuses. Ainsi, introduisons dans une petite bouteille en métal un mélange d'oxygène et d'hydrogène, ou de chlore et d'hydrogène, et faisons-y passer l'étincelle, la combinaison s'opérera immédiatement avec une violente explosion. Voici comment l'on introduit l'étincelle dans le mélange : la bouteille métallique (pistolet de Volta) est percée latéralement d'un trou (fig. 151), dans lequel est mastiqué un tube en verre ; ce tube enveloppe une tige métallique terminée par deux boules : l'une extérieure *a*, que l'on présente à la machine électrique; l'autre *b*, qui se tient à une très-petite distance de la paroi métallique opposée; *ab* s'électrise par influence, et électrise à son tour, toujours par influence, la paroi du vase, de sorte que l'étincelle jaillit simultanément entre la machine et *a*, entre *b* et la paroi.



Fig. 151.

D'un autre côté, quand on fait passer dans une cloche posée sur le mercure et contenant du gaz ammoniac, une série d'étincelles, on arrive à décomposer le gaz et à séparer les deux gaz, azote et hydrogène qui le forment. Au surplus, ces questions reviendront dans le cours de chimie.


Fig. 152.

Électrophore.—Lorsque l'on a besoin plutôt d'étincelles nombreuses que d'étincelles puissantes, on emploie l'*électrophore*, petit instrument très-simple, et que l'on peut construire soi-même facilement (fig. 152). On fait fondre de la résine avec un peu de cire dans une marmite de fonte, et on la coule ensuite dans un plateau en bois ou en métal, à bords peu élevés, de manière que la

résine arrive en affleurement avec ces bords. Pour faire disparaître les soufflures qui se sont formées sur la surface, et rendre cette surface aussi unie que possible, on fait chauffer fortement un fer à repasser, et on le promène à très-petite distance de la résine sans la toucher, de manière à fondre la couche superficielle. Si l'on frappe ce gâteau de résine avec une peau de chat bien sèche, on y développe de l'électricité négative. On prend alors un disque de métal, ou même simplement un disque en bois recouvert d'une feuille d'étain; et le tenant à l'aide d'un manche isolant en verre, on le pose sur le gâteau électrisé ; l'on touche en même temps avec le doigt la surface métallique de ce disque. Si l'on retire après cela le disque, il est électrisé positivement. Son électrisation est due à une action d'influence. Cela peut sembler extraordinaire, puisqu'il y a contact entre l'étain et la résine ; mais la résine est un corps essentiellement mauvais conducteur, et l'électricité reste attachée à sa surface. D'ailleurs le contact est toujours fort imparfait. Quant à l'action d'influence, il est facile d'en rendre compte : l'électricité négative de la résine décompose par influence le fluide neutre du plateau, repousse dans le sol par la main le fluide négatif, et maintient le fluide positif sur le plateau. Lors donc qu'après avoir retiré le doigt on enlève le plateau, il est chargé d'électricité positive.

Électroscope. — On donne le nom d'*électroscope* aux instruments destinés à reconnaître sur un corps la présence de l'électricité, et à constater la nature de cette électricité. Le pendule électrique dont nous avons fait usage jusqu'à présent, est le plus simple de tous les électroscopes; mais pour des expériences un peu délicates, et s'il s'agissait de corps n'ayant qu'une faible tension électrique, cet instrument deviendrait insuffisant. On fait alors usage de l'électroscope à pailles ou à feuilles d'or que nous allons décrire.

Une cloche en verre porte à sa partie supérieure une douille métallique traversée par une tige de laiton portant en haut une boule *a*, et à son extrémité inférieure deux pailles ou deux feuilles d'or, ou deux petites balles de sureau dorées et suspendues

à des fils très-fins de laiton (fig. 153), la cloche sert d'isolant et est recouverte à sa zone supérieure d'une couche de vernis; elle repose en outre sur une table en bois, creusée pour recevoir une soucoupe remplie de matières dessé-chantes, de la chaux vive par exemple, afin de tenir l'air intérieur aussi sec que possible; deux petites tiges en laiton sont implantées dans cette table et portent des boules à leur sommet.

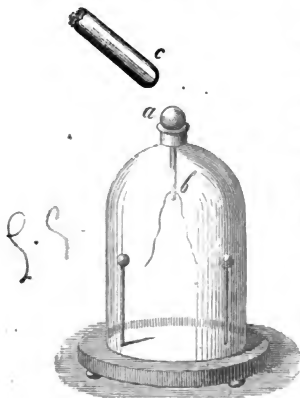


Fig. 153.

Pour se servir de l'électroscope, on commence ordinairement par le charger, soit par contact direct, soit par l'influence, d'une électricité connue. Ainsi on prend un bâton de verre électrisé positivement, et on le présente à une petite distance de la boule *a*, en touchant en même temps cette boule avec le doigt. Le fluide positif est repoussé dans le sol, et le fluide négatif est retenu. On enlève ensuite le doigt, puis le bâton de verre, et l'instrument reste chargé d'électricité contraire à celle du corps qui a servi à l'électriser par influence. Si l'on avait procédé par contact direct, l'électroscope aurait été évidemment chargé d'électricité pareille à celle du corps électrisant. — Quoi qu'il en soit, du moment où ce corps électrisant est retiré, l'instrument reste chargé d'électricité connue ; et ses pailles, électrisées toutes deux de la même manière, se repoussent mutuellement et prennent un certain degré d'écartement.

Approchons alors de la boule *a* le corps que nous supposons être électrisé. S'il est électrisé, il devra modifier l'état de l'électroscope par une action d'influence, et par suite augmenter ou diminuer l'écartement des pailles. Ainsi, l'électroscope étant chargé négativement, supposons que le corps que l'on présente soit aussi chargé négativement, il agira alors par influence sur le fluide neutre de *ab*, en portant par conséquent du fluide négatif vers *b* qui s'ajoutera à celui qui y est déjà, attirant au contraire du fluide positif dans la boule *a* pour neutraliser une partie équivalente du fluide négatif qui s'y trouve; cela revient donc à faire passer du fluide négatif de *a* en *b*.

Ainsi l'écartement plus grand des pailles indiquera à coup

sûr que le corps était électrisé, et électrisé comme l'électroscope lui-même.

Si le corps est chargé positivement, il agira d'une manière tout opposée; il agira par influence sur le fluide neutre de *ab* pour repousser le fluide positif vers *b*, et y neutraliser une certaine portion du fluide négatif qui s'y trouve, en même temps qu'il appellera du fluide négatif en *a*. Les pailles seront donc moins chargées et leur écartement diminuera. Le rapprochement des pailles indique donc aussi l'électrisation du corps et une électrisation de nom contraire à celle de l'électroscope.

Cet indication par rapprochement est moins sûre que l'indication par écart, et peut donner lieu à des erreurs.

En effet, si l'action d'influence du corps sur l'électroscope est un peu énergique, il pourra se faire que tout le fluide des pailles soit neutralisé, et même qu'il se développe sur elles un excédant de fluide de nom contraire. Alors les pailles se rapprocheront jusqu'au contact pour s'écarter de nouveau. Ces deux mouvements contraires peuvent tromper l'opérateur.—De plus, si le corps qu'on approche n'est pas électrisé, et qu'au contraire, l'électroscope le soit un peu fortement, alors il y aura action d'influence de l'électroscope sur le corps, surtout si celui-ci est conducteur. Le fluide de nom contraire à celui de l'électroscope sera appelé en C et tendra alors à faire monter le fluide même de l'instrument dans la boule *a*, par suite à décharger les pailles, à les faire rapprocher. Ainsi il peut y avoir mouvement de rapprochement des pailles, quoique le corps présenté ne soit pas électrisé. Il vaut donc mieux ne s'en fier qu'à l'indication d'écartement. Dès lors, pour être sûr de ne point se tromper, le plus sage est d'avoir à côté l'un de l'autre deux électroscopes, l'un positif, l'autre négatif; de leur présenter successivement le corps supposé électrisé, et de s'arrêter à l'indication de celui dont les pailles s'écartent davantage. On peut juger, au moins approximativement, de la charge électrique du corps par l'accroissement de l'écart des pailles. Pour cela on peut disposer dans l'instrument un petit arc divisé en ivoire devant lequel se meuvent les pailles.

Quant aux petites tiges *mn*, leur rôle est facile à comprendre; elles s'électrisent par l'influence des pailles, et, leur présentant leurs boules *m* et *n* chargées de fluide contraire au leur, tendent à augmenter leur écartement et accroissent, par conséquent, la sensibilité de l'instrument. Elles servent encore à limiter l'écartement des pailles et à les empêcher d'aller tou-

cher les parois sèches de la cloche et y déposer de l'électricité qui nuirait au succès des opérations. Les pailles, attirées par elles, les touchent si elles sont trop fortement écartées, s'y dépouillent de leur électricité et retombent verticales.

L'appréciation de la tension électrique par l'électroscope à pailles est toujours fort incertaine. Pour avoir des résultats plus sûrs à cet égard, il faut recourir à l'électromètre ou balance de torsion de Colomb, dont nos lecteurs trouveront la description dans les *Éléments de physique expérimentale* de M. Pouillet, tome Ier, page 474.

Bouteille de Leyde. — Lorsqu'on veut obtenir des effets énergiques, on emploie la *bouteille de Leyde*, ainsi nommée parce qu'elle fut inventée, vers le milieu du XVIIIe siècle, à Leyde, par *Muschenbroeke* et *Cuneus*.

Pour faire une bouteille de Leyde, on prend un flacon en verre (fig. 154), que l'on remplit avec des feuilles d'or, de clinquant ou d'étain; puis on ferme la bouteille avec un bouchon, dans lequel on passe une tige qui va toucher à l'intérieur par sa partie pointue les feuilles métalliques, et qui se termine extérieurement par un bouton; enfin, on colle à la surface de la bouteille de Leyde une feuille d'étain qui recouvre le fond et les parois jusqu'à 3 ou 4 centimètres de la naissance du goulot.


Fig. 154.

Il est bon de recouvrir d'un vernis non conducteur la surface du verre restée à nu. Pour charger la bouteille de Leyde, on prend à la main l'armature extérieure, c'est-à-dire la feuille d'étain qui enveloppe le verre, et l'on présente le bouton de la tige, qui communique à l'armature métallique intérieure, au conducteur de la machine électrique. On juge de la charge de la bouteille par le nombre et la force des étincelles. L'armature intérieure est alors électrisée positivement, car il y a eu décomposition du fluide neutre par influence; et puisque le fluide négatif s'est combiné au fluide positif de la machine, il reste sur l'armature du fluide positif. En même temps le fluide neutre de l'armature extérieure s'est aussi décomposé par l'in-

fluence de l'électricité positive développée au dedans de la bouteille ; le fluide positif s'est écoulé dans le sol, et le fluide négatif reste adhérent à la surface du verre, attiré par le fluide positif de l'armature intérieure. Cette décomposition par influence est en outre accompagnée d'une accumulation d'électricité dont il est facile de rendre compte.

Lorsqu'un corps conducteur est mis en contact avec une source d'électricité, il ne peut acquérir qu'une certaine tension électrique déterminée, en rapport avec celle de la source. Mais si, sans rien changer à sa charge, on vient à équilibrer par un moyen quelconque la tension de son fluide, alors il pourra recevoir une nouvelle dose de fluide de la source.

Or, remarquons que le fluide négatif, développé sur l'armature extérieure, combat à distance les effets du fluide positif résidant dans l'armature intérieure et tend à les équilibrer *en partie*; ce qui revient à un affaiblissement de la tension du fluide positif. Dès lors la machine électrique peut fournir une nouvelle dose de fluide à l'armature intérieure; nouvelle décomposition par influence sur l'armature extérieure. Ce surcroît de fluide négatif équilibre en partie la tension du fluide positif survenu dans l'armature intérieure, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'équilibre entre la tension de la source et celle du fluide positif de l'armature intérieure soit rétabli, mais avec accumulation de fluide sur cette armature ainsi que sur l'armature extérieure.

Si maintenant on fait communiquer, soit à l'aide des mains, soit par un conducteur métallique, les deux armatures l'une avec l'autre, les deux fluides se recombinent avec une vive étincelle. En même temps, si la communication a été établie avec les mains, on éprouve une commotion d'autant plus violente, que la bouteille est plus grande, la machine électrique plus forte, les étincelles qui ont chargé la bouteille plus brillantes et plus nombreuses. Cette commotion, lorsqu'elle est faible, se fait sentir seulement dans les jointures des doigts et au poi-

gnet ; plus forte, elle s'étend aux articulations du bras et même jusqu'à la poitrine : alors elle peut être dangereuse.

Si plusieurs personnes se tiennent par la main, la première tenant la bouteille de Leyde par l'une des armatures, au moment où la dernière personne présentera à petite distance sa main à la seconde armature, et fera jaillir l'étincelle, la commotion se fera ressentir dans toute la chaîne, et à peu près également sur tous les individus qui la composent.

Batterie électrique. —Les effets produits par la bou-

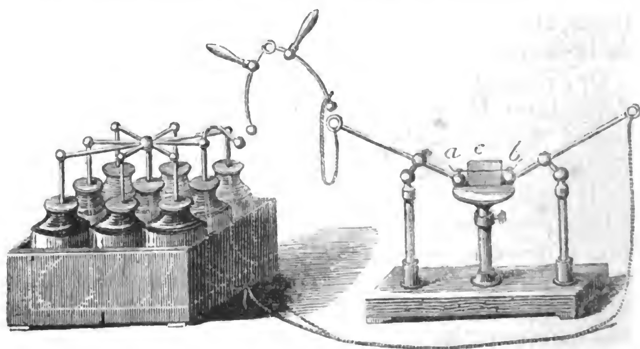


Fig. 155.

teille de Leyde sont déjà beaucoup plus énergiques que ceux de la machine électrique. On en augmente encore la puissance en associant ensemble plusieurs bouteilles pour en constituer une *batterie*.

On place pour cela neuf grandes bouteilles de Leyde dans une caisse dont le fond est couvert d'une feuille d'étain, de manière à faire communiquer ensemble toutes les armatures extérieures, puis on rattache les boutons des armatures intérieures au bouton de la bouteille centrale par une série de tiges formant étoiles (fig. 155). On met alors le fond de la caisse en rapport avec le sol, à l'aide d'une chaîne métallique ; puis avec une autre

chaîne on relie l'armuture intérieure de la bouteille centrale au conducteur de la machine. Il ne reste plus, pour charger la batterie, qu'à tourner le plateau jusqu'à ce que le pendule de la machine soit devenu à peu près horizontal.

Avec la batterie ainsi chargée, nous pourrons fondre et même volatiliser des fils métalliques. Nous nous servirons, pour ces expériences, de l'excitateur universel (fig. 155). Aux deux boules *a* et *b* nous attachons un fil de soie recouvert d'argent ou d'or; nous faisons ensuite communiquer par une chaîne l'une des tiges avec l'armature extérieure de la batterie, isolée maintenant du sol; puis, avec un arc métallique appelé excitateur, tenu par des manches en verre, nous faisons passer l'étincelle de l'autre tige à l'armature intérieure. L'or est volatilisé et la soie se trouve mise à découvert, mais non brûlée, parce que le métal a servi de véhicule au fluide.

Si nous enlevons les boules *a* et *b* pour les remplacer par de petites pointes, puis si nous plaçons entre ces pointes une carte, elle sera percée par le passage de l'étincelle. On pourrait de même percer une plaque de verre un peu épaisse et bien sèche.

Quant aux commotions produites par la batterie, elles sont tellement puissantes qu'on a pu, avec une forte batterie composée de douze grandes jarres, tuer un bœuf. On comprend dès lors que le maniement de cet instrument exige de grandes précautions.

Électricité atmosphérique.—Du jour où la construction de puissantes machines électriques permit d'obtenir de longues et brillantes étincelles, les physiciens furent frappés de l'analogie que présentaient ces étincelles avec l'éclair; analogie dans sa forme sinueuse et brisée, dans sa lumière violacée et instantanée, dans le bruit qui l'accompagne et qui pouvait rappeler, en petit, il est vrai, les éclats formidables du tonnerre, analogie dans les effets mécaniques, physiques, chimiques et physiologiques qu'elle produit. Aussi Franklin, en Amérique, Dalibard, Charles, de Romas, de Saussure, en France, cherchèrent-ils à l'envi à constater la présence de l'électricité dans

les nuages orageux ; ils lancèrent dans les airs des cerfs-volants armés de pointes, retenus par des supports isolants ; ils purent ainsi tirer de la corde des étincelles de plusieurs mètres de longueur accompagnées de détonations aussi fortes que celles d'un pistolet, obtenir les phénomènes d'attraction et de répulsion qui caractérisent les corps électrisés.

De Saussure, et, plus tard, M. Peltier, ont employé l'électroscope pour explorer les couches de l'atmosphère ; ils remplaçaient la boule de l'instrument par une longue tige verticale dont le rôle est facile à comprendre. Cette tige, en présence des couches électrisées de l'atmosphère, s'électrisait par influence, le fluide de nom contraire s'écoulant par la pointe, le fluide de même nom venant s'accumuler dans les pailles pour déterminer leur écartement. En approchant alors un bâton de verre électrisé positivement, on pouvait reconnaître la nature de l'électricité des pailles.

On a pu ainsi constater que l'atmosphère est électrisée, non pas seulement en temps d'orage, mais constamment. Lorsque le ciel est serein, l'électricité de l'air atmosphérique est positive ; elle n'est appréciable qu'à une certaine distance du sol, la terre devant évidemment dépouiller d'électricité les couches en contact avec elle. La dose d'électricité répandue dans l'atmosphère est d'ailleurs variable aux diverses heures du jour, suivant le plus ou moins d'humidité de l'air. Quant à la cause productrice de cette électricité, elle réside peut-être dans le phénomène de l'évaporation. M. Pouillet a, en effet, reconnu que la vapeur qui s'échappe d'une dissolution saline est électrisée positivement. — Cependant, comme les circonstances de température de l'expérience ne sont pas celles de l'évaporation spontanée, on peut encore regarder la solution de la question comme douteuse.

Lorsque le ciel est couvert, les nuages sont électrisés, les uns positivement, les autres négativement, et ces nuages jouent alors le rôle de machine électrique par rapport au sol ou aux autres nuages ; il ne faut pas oublier que les nuages formés de vapeur d'eau condensée, sont des corps conducteurs qui peuvent, par conséquent, subir et exercer des actions d'influence. Dès lors on s'explique qu'il y en ait de négatifs aussi bien que de positifs, quoique la vapeur d'eau, suivant M. Pouillet, n'apporte dans l'atmosphère que de l'électricité positive.

Si deux nuages sont en présence, chargés d'électricités contraires, l'étincelle qui jaillit entre eux, lorsqu'ils sont suffisam-

ment rapprochés, s'explique sans peine ; elle indique la recombinaison des fluides à travers l'air.

Si les deux nuages sont chargés d'électricités de même nom, le plus fortement chargé exerce sur l'autre une action d'influence qui met dès lors en regard des électricités contraires, et l'étincelle jaillit quand ils sont à assez petite distance.

Il en serait de même s'il arrivait que l'un d'eux fût à l'état neutre.

Enfin tout nuage électrisé agit par influence sur le sol, appelant dans les parties les plus saillantes le fluide de nom contraire au sien, et si la distance est suffisamment petite, il y a étincelle. Tels sont les différents cas où, comme on dit vulgairement, jaillit la foudre.

Choc en retour. — Il est cependant encore un cas où les effets propres à la foudre se manifestent dans les corps sans qu'il y ait eu cependant étincelle. Supposons qu'un nuage, d'une grande étendue agisse simultanément par influence sur plusieurs points saillants du sol, et que, par l'effet de sa décharge sur un autre nuage, ou sur un point A du sol, sa tension électrique se trouve subitement détruite ou très-fortement affaiblie ; alors les fluides que l'action d'influence avait séparés en un autre point B, se recombinent brusquement et produisent sur le corps B les mêmes effets que le choc direct ; c'est ce que l'on appelle le *choc en retour*.

Éclair. – L'éclair, qui n'est autre chose que l'étincelle électrique, n'a pas toujours le même aspect, il présente souvent la forme d'une ligne brillante, étroite, sinueuse ; mais très-souvent aussi, il illumine soudainement une étendue plus ou moins vaste du ciel nuageux. Ce sont surtout là les éclairs que l'on cherche à imiter dans les théâtres, ce sont aussi ceux que l'expérience a montrés être moins dangereux. L'immense développement en longueur que présente fréquemment l'éclair, s'explique par la présence des petits nuages disséminés entre les nuages principaux ; ce qui rend compte, en outre, de la forme sinueuse de l'éclair, comme nous l'avons dit plus haut pour l'étincelle de la machine.

Tonnerre. — Quant au bruit du tonnerre, il a pour cause l'ébranlement produit dans l'air par la recombinaison des fluides. Nous avons déjà expliqué dans le chapitre sur le son le retard du bruit du tonnerre sur la perception visuelle de l'éclair. Quant à la durée de ce bruit, elle est aussi la conséquence du fait de la propagation du son ; elle s'explique comme l'audition succes-

sive des coups de fusil des tirailleurs, faisant tous feu en même temps et dont nous avons parlé dans ce même chapitre. Enfin les éclats, les roulements, les redoublements d'intensité sont dus à des phénomènes d'échos et aussi à la forme sinueuse de l'éclair qui fait que plusieurs points de l'espace situés à une même distance de l'oreille, sont ébranlés en même temps et produisent alors l'effet d'une détonation multiple.

Effets de la foudre. — Quant aux effets produits par la foudre, tout le monde les connaît; rupture, déchirement, transport des corps médiocres conducteurs qui ne fournissent pas un écoulement au fluide; fusion, volatilisation des corps métalliques qui, tout en étant conducteurs, n'offrent pas une section assez grande au passage de l'électricité; l'inflammation des corps combustibles; puis, pour les êtres vivants, décomposition des tissus analogue à celle que produisent les brûlures, paralysie plus ou moins complète du système nerveux; la mort même; enfin tous les effets de la batterie électrique, mais avec une énergie bien autrement grande. Une description circonstanciée de ces effets nous entraînerait trop loin, et nous ne pouvons que recommander à nos lecteurs l'intéressante notice publiée par Arago dans l'*Annuaire des longitudes*, année 1838.

Paratonnerre. — Il ne nous reste plus qu'à indiquer les moyens de se préserver des atteintes de ce redoutable fléau. On sait que c'est à Franklin que l'on doit l'invention des paratonnerres. Lorsqu'on présente à la machine électrique la main armée d'une pointe, le fluide neutre est décomposé par influence; le fluide positif est repoussé dans le sol et le fluide négatif s'écoule par la pointe à mesure qu'il se développe, et va même neutraliser le fluide de la machine. Il ne reste donc plus sur le corps de l'observateur ni fluide positif ni fluide négatif et la machine est, en outre, déchargée en partie; dès lors plus d'étincelle possible entre la main et le conducteur.

Par imitation de ce qui se passe dans cette circonstance, établissons une pointe sur le sommet d'un édifice, et dans le cas d'orage, il ne devra point s'accumuler de fluide sur cet édifice, et même il pourra y avoir affaiblissement dans la charge électrique des nuages; il est évident aussi qu'il ne pourrait plus y avoir de choc en retour.

Pour que le paratonnerre exerce une action préservatrice bien complète, il doit remplir certaines conditions.

1° Sa longueur doit être proportionnée à l'étendue de l'espace qu'il a à protéger. On peut admettre, d'après l'expérience, qu'un

paratonnerre ne protége efficacement qu'un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur au-dessus du sol. Il faudra donc, sur un édifice de grand développement, établir plusieurs paratonnerres. Il faut autant que possible éviter la fusion et l'oxydation de la pointe extrême; aussi forme-t-on cette pointe avec du cuivre terminé par un bout de platine. Il faut que la tige ait un assez gros diamètre, non pas seulement pour offrir de la rigidité, mais, en outre, pour présenter un écoulement facile au fluide.

Il faut que la tige communique avec le sol par une chaîne conductrice : cette chaîne part du point d'attache de la tige à la maîtresse poutre de la toiture, descend sur le toit, puis le long des murs, maintenue à une distance d'environ 1 décimètre de la muraille, puis elle s'enfonce dans le sol en se divisant ordinairement en plusieurs branches pour augmenter les contacts ; on fait même arriver ordinairement et plonger ces branches dans des puisards ou des galeries remplies de braise, substance très-conductrice.

De plus toutes les parties métalliques importantes de l'édifice doivent être mises en communication avec la chaîne pour faciliter l'écoulement de leurs fluides.

Il est aussi très-essentiel de vérifier fréquemment l'état de cette chaîne et de s'assurer qu'elle ne présente pas de solution de continuité qui empêcherait l'écoulement des fluides, car le paratonnerre, dans ce cas, deviendrait lui-même une cause de danger.

CHAPITRE XVI.

AIMANT. — MAGNÉTISME.

On donne le nom d'*aimant* à une substance minérale qui n'est autre qu'un oxyde de fer et qui jouit de la propriété d'attirer le fer et l'acier. Cette attraction se manifeste à distance plus ou moins grande, suivant les dimensions de l'aimant, et celles du morceau de fer mis en mouvement; elle se produit même à travers le verre ou le bois, ou un obstacle quelconque interposé.

Le nom ancien de l'aimant, *magnes*, a fait donner le nom de magnétisme à la cause de ce phénomène, ainsi qu'à l'ensemble théorique des faits qui s'y rattachent.

Pôles. Ligne neutre. — La vertu magnétique peut être communiquée artificiellement à des barreaux d'acier par des procédés que nous exposerons plus tard. Mais qu'il s'agisse d'aimants naturels ou d'aimants artificiels, il est facile de reconnaître que l'attraction magnétique ne s'exerce pas également par tous les points de la surface; qu'il est des parties de l'aimant qui semblent douées au plus haut degré de cette vertu attractive; d'autres qui ne la possèdent nullement. Ainsi, quand on roule une pierre d'aimant dans la limaille, on voit celle-ci s'attacher à certaines portions de la surface, toujours les mêmes, en laissant les autres à découvert, quoique aucune différence physique extérieure ne paraisse distinguer ces régions.

Le fait est pour le moins aussi marqué avec les aimants artificiels. Si, par exemple, on place sur un barreau aimanté une lame de verre maintenue horizontale, et sur cette lame de verre une feuille de papier, on verra, en projetant de haut de fines limailles de fer, cette poussière se distribuer en houppes rayonnantes autour de deux points placés chacun dans le voisinage d'une des extrémités du barreau, en s'écartant, au contraire, de la partie moyenne (fig. 156).

Ces centres d'attraction s'appellent les *pôles* de l'aimant, et la région où l'action attractive paraît nulle, s'appelle *ligne neutre*. Chaque barreau aimanté a ordinairement deux pôles; quelquefois cependant les procédés d'aimantation, comme nous le ver-

rons plus tard, en développent plus de deux; les pôles intermédiaires prennent alors le nom de *points conséquents*.

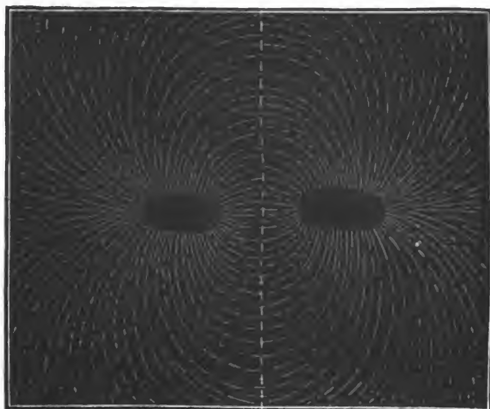


Fig. 156.

Propriétés distinctives des deux pôles d'un aimant. — Quoique les deux pôles d'un aimant agissent de la même façon sur le fer et l'attirent toujours, il ne faudrait pas croire cependant qu'ils aient les mêmes propriétés; l'expérience va nous prouver tout le contraire.

Suspendons un barreau aimanté à un fil de manière qu'il se tienne horizontal, puis approchons de l'un des pôles de ce barreau, successivement, les deux pôles d'autant de barreaux aimantés qu'il nous plaira. Nous voyons alors qu'il y a toujours, pour chaque barreau essayé, un pôle qui repousse le pôle de l'aimant mobile, et l'autre pôle qui l'attire. Ainsi, les deux pôles d'un même barreau aimanté agissent de façon tout opposée sur un même pôle d'un aimant mobile. Ils sont doués de propriétés contraires.

Après avoir marqué de la lettre A tous les pôles qui repoussent le pôle choisi de l'aimant mobile, et de la lettre B ceux qui l'attirent, présentons ces mêmes pôles A au second pôle de l'aimant mobile, et alors nous constaterons au contraire une attraction; présentons les pôles B, et nous aurons une répulsion. Ainsi les deux pôles de l'aimant mobile sont aussi doués, comme ceux de tous les autres aimants, de propriétés opposées.

Enfin, présentons le pôle A d'un de ces barreaux au pôle A

d'un autre de ces barreaux, rendu mobile de la même manière que le barreau d'essai, et nous constaterons que ces deux pôles A se repoussent; les deux autres pôles, marqués B, se repoussent également; mais le pôle A de l'un d'eux attire le pôle B de l'autre.

En convenant d'appeler pôles de même nom tous les pôles A, d'appeler aussi pôles de même nom tous les pôles B, mais d'appeler pôles de noms contraires les pôles A comparés avec les pôles B, nous pourrons résumer ces différents faits d'expérience sous cette forme déjà connue pour l'électricité :

Les pôles de même nom se repoussent;

Les pôles de nom contraire s'attirent. D'après cela le pôle de l'aimant mobile qui était repoussé par tous les pôles A, doit être aussi marqué comme pôle A; et son second pôle marqué comme pôle B.

Ces analogies avec l'électricité ont fait attribuer les phénomènes manifestés par les aimants à un fluide qu'on a appelé fluide magnétique, et qui, comme le fluide électrique, serait snsceptible de se décomposer en deux fluides doués de propriétés antagonistes.

Il y a cependant de notables différences entre l'état des corps aimantés et celui des corps électrisés par frottement ou par influence. Ainsi un corps électrisé peut ne présenter que du fluide positif, tandis qu'un barreau aimanté a toujours au moins deux pôles contraires. Un corps électrisé peut perdre son électrisation par le contact des corps conducteurs; tandis qu'un corps aimanté conserve son état magnétique quel que soit le corps avec lequel il se trouve en contact. Ainsi les fluides magnétiques, si fluides magnétiques il y a, ne peuvent passer d'un corps à un autre. Il y a plus; si l'on prend une aiguille d'acier aimantée, et si on la brise en autant de fragments que l'on voudra, chaque fragment se trouve être un aimant à deux pôles. Il suit de là que dans un aimant les fluides magnétiques antagonistes ne sont pas séparés comme ils le sont dans un cylindre électrisé par influence. Ils existent partout simultanément, mais répartis de manière à donner deux résultantes contraires, l'une ayant son point d'application au point que nous avons appelé A, l'autre au point que nous avons appelé B.

Dans un barreau de fer ou d'acier non aimanté, les deux fluides sont combinés formant du fluide neutre. Par l'aimantation la masse du fluide magnétique se décompose en petites atmosphères distinctes, et qui ne peuvent se fondre ensemble;

chacune de ces atmosphéres a en outre ses deux fluides séparés ; et c'est par suite de cette décomposition dans chaque centre magnétique, que naissent les deux résultantes totales appliquées aux pôles.

Aimantation par influence. — L'aimantation, comme l'électrisation, se développe par influence.

Prenons un morceau de fer, parfaitement affiné, et chimiquement pur. Si nous le présentons à de la limaille, pure également, il n'y aura de l'un à l'autre aucune attraction; approchons-le des pôles d'une aiguille aimanté, et nous le verrons attirer indifféremment les deux pôles et être attiré par eux.

Si maintenant nous plaçons ce petit barreau de fer MN, bout à bout avec un barreau aimanté, qui présente son pôle marqué A à l'extrémité M, les phénomènes changent du tout au tout; car maintenant de la limaille projetée sur le petit barreau de fer MN s'attache à ses extrémités, et une aiguille aimantée mobile autour d'un axe parallèle à MN a son pôle A repoussé par N et attiré par M, son pôle B repoussé par M et attiré par N. Ainsi MN est devenu un véritable barreau aimanté ayant un pôle A en N, et un pôle B en M. L'analogie avec les phénomènes de l'électrisation par influence est frappante.

Si l'on retourne le petit barreau MN, ou si, laissant ce petit barreau en place, on retourne le barreau aimanté, alors N devient un pôle B, et M un pôle A, et cela sans transition, instantanément. Si on éloigne petit à petit le barreau aimanté, l'état magnétique de MN s'affaiblit progressivement, et, au delà d'une certaine distance, variable avec la force du barreau, s'éteint complétement.

Si on enlève subitement ce barreau, MN retombe immédiatement à l'état neutre. Il est redevenu inerte par rapport à la limaille, et est désormais attiré indifféremment par les deux pôles de l'aiguille aimantée.

On comprend alors pourquoi il doit toujours agir par attraction sur l'aiguille, puisque, subissant de sa part une action d'influence, il doit toujours s'aimanter de manière à présenter à son pôle, quel qu'il soit, un pôle de nom contraire.

Force coercitive de l'acier. — Si au barreau de *fer doux* MN (c'est ainsi qu'on désigne le fer pur) on substitue une aiguille d'acier, les mêmes phénomènes se présentent, quoique plus lentement et d'une manière moins marquée; mais avec cette grande différence qu'une fois l'aimantation développée dans l'acier, elle persiste quand la cause directe de l'action d'in-

fluence est éloignée. Le retournement de l'aiguille ou celui du barreau ne produit plus ce renversement instantané des pôles que présente le fer doux. Ce n'est qu'au bout d'un temps plus ou moins long que l'aimantation primitive se trouvera annulée et remplacée par une aimantation inverse.

Le fer incomplétement affiné et contenant encore du carbone en combinaison, surtout s'il a subi des opérations mécaniques propres à l'écrouir, à lui donner du cassant, de la sécheresse, à le rendre *aigre*, pour employer le terme en usage dans les ateliers, se comporte comme l'acier.

Il y a donc dans l'acier, dans le fer aigre, une résistance propre qui s'oppose à tout ce qui tend à y troubler l'équilibre magnétique, qui fait obstacle à la décomposition du fluide neutre, et aussi à sa recomposition, quand les deux fluides qui le constituent ont été séparés. Cette résistance est ce que l'on appelle la *force coercitive*.

Pendant longtemps le fer a été la seule substance dans laquelle on eût reconnu cette faculté de s'aimanter *instantanément* et *passagèrement* sous l'influence d'un barreau aimanté. Plus tard on a constaté la même propriété dans la manganèse, le nickel, le cobalt, et enfin, grâce à l'emploi de puissants aimants et de dispositions particulières d'expériences, la liste de ces corps, sans force coercitive, et que l'on désigne, pour les distinguer des aimants, sous le nom de substances *simplement magnétiques*, s'est considérablement accrue. Seulement il en est quelques-uns, en assez petit nombre il est vrai, qui se comportent tout autrement que le fer et qui, au lieu d'être attirés comme lui par un barreau aimanté, sont toujours repoussés. Tel est, par exemple, le bismuth. On appelle ces corps substances *diamagnétiques*. Quant à la cause de cette répulsion, elle est encore inconnue.

Magnétisme terrestre.— Les phénomènes d'attraction et de répulsion entre les pôles des aimants ne sont pas les seuls faits intéressants que nous ayons à citer. Il est encore un fait d'une très-haute importance et qui, connu moins anciennement que l'attraction sur le fer, a déterminé, dès l'instant où il a été bien observé, une véritable révolution dans l'art de la navigation. Je veux parler de la propriété que possède l'aiguille aimantée suspendue de prendre une direction déterminée dans l'espace, de s'orienter.

Si l'on suspend un morceau de fer ou d'acier non aimanté dans une position horizontale, il garde dans ce plan horizontal

toutes les positions qu'on lui donne. Si on suspend au contraire horizontalement une aiguille aimantée, elle prend d'elle-même une position d'équilibre stable dont la direction à Paris, en 1858, fait avec la direction de la méridienne astronomique un angle d'à peu près 20°, à l'ouest pour la partie de l'aiguille qui se rapproche le plus du nord, à l'est pour l'autre extrémité.

Si l'on dérange l'aiguille de cette position, elle y revient d'elle-même par un mouvement d'oscillation qui se prolonge d'autant plus que la suspension est plus mobile.

Que l'on refasse cette même expérience avec vingt aiguilles différentes, ayant toutes leurs pôles marqués comme nous l'avons dit plus haut, et l'on trouvera que leurs directions sont toutes les mêmes, et que, pour toutes ces aiguilles, les pôles marqués de la même lettre se dirigent vers le même point de l'horizon. Ainsi on pourrait encore définir pôles de même nom pour deux aiguilles, les pôles qui se dirigent vers le même point. Supposons que ce soient les pôles A qui se dirigent vers le point N. 20° O. ou, pour abréger, disons vers le nord, en négligeant pour le moment l'angle de 20°; quelle raison pouvons-nous donner de cette direction?

Prenons une règle plate en bois et disposons au-dessus une aiguille mobile sur un pivot vertical. Si nous faisons tourner la règle dans le plan horizontal, autour de la verticale qui passe par le pivot, nous voyons l'aiguille conserver sa direction par rapport à l'horizon, et regarder toujours par son pôle A le point nord.

Substituons maintenant à la règle de bois un fort barreau aimanté et recommençons l'expérience; nous voyons l'aiguille se placer parallèle au barreau, son pôle A regardant le pôle B du barreau; et elle se maintient dans ce parallélisme quand on fait tourner le barreau sur lui-même, les pôles de nom contraire restant toujours en regard.

Or c'est précisément ainsi que se comporte la terre vis-à-vis de l'aiguille, puisque, entraînée dans le mouvement de translation et de rotation, celle-ci conserve toujours la même position par rapport à la méridienne.

On est donc naturellement conduit à assimiler la terre à un barreau aimanté qui aurait un pôle magnétique B dans son hémisphère boréal; celui-là nous l'appellerons le *pôle magnétique boréal* de la terre, et un pôle A dans son hémisphère austral, nous l'appellerons son *pôle magnétique austral*.

Alors nous devons appeler, d'après la loi d'attraction des

pôles de nom contraire, *pôle austral* de l'aiguille le pôle de cette aiguille qui regarde le pôle boréal de la terre, et appeler *pôle boréal* celui qui regarde le pôle austral terrestre.

Enfin, étendant ces dénominations aux fluides magnétiques eux-mêmes, nous appelons *fluide austral* celui dont l'action prédomine dans l'hémisphère austral de la terre, et aussi au pôle austral d'un barreau; et *fluide boréal* celui dont l'action prédomine dans l'hémisphère boréal de la terre, et aussi au pôle boréal d'un barreau.

N'oublions pas que le pôle austral d'une aiguille ou d'un barreau est celui qui se dirige vers le nord.

Déclinaison.—On appelle *déclinaison* l'angle que l'aiguille aimantée, suspendue horizontalement, fait avec la méridienne astronomique du lieu, et l'on appelle méridien magnétique le plan qui passe par la direction de l'aiguille en équilibre et par la verticale de son centre de suspension.

La déclinaison est dite *orientale* ou *occidentale* dans notre hémisphère, suivant que le pôle austral se porte à l'est ou à l'ouest de la méridienne.

La déclinaison est, en effet, bien loin d'être toujours la même aux divers points de la terre; ainsi, en se transportant vers l'ouest, sur le parallèle de Paris, on trouve d'abord des points où la déclinaison est, comme à Paris, occidentale; puis l'angle diminue, vers 86° de longitude occidentale, la déclinaison est nulle, c'est-à-dire que l'aiguille a rigoureusement la direction du nord; puis au delà elle devient orientale. A 180° de longitude de Paris, l'aiguille fait un angle d'environ 15° à l'est avec la méridienne; puis l'angle diminue; on trouve de nouveau un point sans déclinaison, et au delà de la déclinaison redevient, comme à Paris, occidentale.

Des variations analogues se présentent sur les différents parallèles.

De plus, dans un même lieu, la déclinaison n'est pas toujours la même; ainsi, vers 1660, elle a été nulle à Paris; auparavant elle était orientale. Depuis cette époque elle a été constamment occidentale. Sa valeur a été croissant, jusque vers 1814, et à partir de ce moment, elle va en diminuant : elle est maintenant, comme nous l'avons dit, d'environ 20°.

Boussole. — On appelle *boussole de déclinaison*, et même simplement boussole, l'instrument propre à observer la déclinaison quand on connaît, par les moyens astronomiques, la direction de la méridienne du lieu, ou bien à donner cette mé-

ridienne, et par suite la position des points cardinaux, quand on connaît, au lieu où l'on se trouve, la valeur de la déclinaison.

L'instrument se compose d'une caisse cylindrique ou prismatique dont le fond est ordinairement maintenu horizontal par un système de suspension appelé, du nom de son inventeur, suspension de *Cardan* (fig. 157). C'est surtout pour les boussoles de vaisseau, nommées aussi *compas de route*, que cette suspension est nécessaire. Sur le fond de la boîte est dessinée une rose des vents, ou un cercle divisé en 16 ou 32 secteurs égaux. Au centre de ce cercle est un petit pivot sur lequel repose une chape d'agate. Sur les bords de cette chape est posée l'aiguille aimantée, qui a la forme d'un losange allongé ; elle est percée d'un trou rond dans lequel passe la chape.

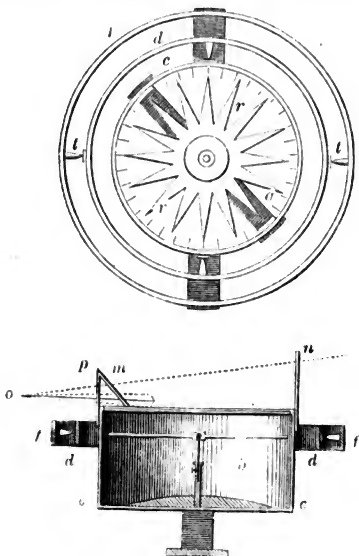


Fig. 157.

Quelquefois la boussole est accompagnée d'un système de lunette ou de pinnules *p*, *n*, propre à fixer astronomiquement la direction de la méridienne ; on oriente la ligne N. S., dite ligne de foi du cadran suivant cette direction, et alors une simple lecture sur le cercle divisé donne la valeur de la déclinaison.

Supposons, au contraire, que l'on sache que dans un lieu donné, la déclinaison est de 20° ouest, et que l'on veuille s'orienter, c'est-à-dire avoir la direction du nord au sud, qui donne par suite celle de l'orient à l'occident à 90° de la première, et cela sans le secours des astres que l'on ne peut pas toujours observer. Il suffira évidemment de placer la boussole

et avec elle le bâtiment qui la porte, si l'on est en mer, de telle sorte, que la ligne N. S. fasse, avec la moitié australe de l'aiguille en équilibre, un angle de 20° à droite, par conséquent vers l'est; alors cette ligne N. S. donne la direction nord-sud.

Inclinaison. — Jusqu'à présent nous avons supposé l'aiguille astreinte par son mode de suspension à se mouvoir dans un plan horizontal.

Mais si l'axe de suspension de l'aiguille passe par son centre de gravité et est fixé dans un plan horizontal, de telle sorte que l'aiguille soit condamnée à se mouvoir dans un plan vertical, on remarque que cette aiguille s'incline, sa partie australe s'abaissant, dans notre hémisphère, au-dessous du plan horizontal qui comprend l'axe, et sa partie boréale s'élevant d'autant au-dessus du même plan. L'angle de l'aiguille, avec le plan horizontal, change avec la direction du plan de rotation. Il a sa plus petite valeur quand ce plan de rotation coïncide avec le plan du méridien magnétique. Il est au contraire de 90° quand le plan de rotation est perpendiculaire au méridien magnétique. L'angle aigu formé avec l'horizon dans le plan du méridien magnétique s'appelle l'*inclinaison*. On mesure cet angle avec la boussole d'inclinaison dont nous donnons ci-contre la figure, facile à comprendre (fig. 158). Le cercle horizontal sert, lorsqu'on connaît la déclinaison du lieu et la méridienne, à amener le plan du cercle vertical dans la direction du méridien magnétique. C'est ensuite sur ce cercle vertical qu'on lit la valeur de l'inclinaison.

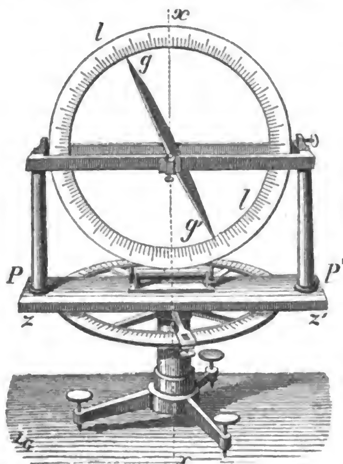


Fig. 158.

Si on transporte la boussole d'inclinaison sur un méridien, on voit, au fur et à mesure que l'on marche vers le nord, l'aiguille tendre de plus en plus vers la position verticale, et pren-

dre cette position en un certain point de l'hémisphère boréal. Ce point est le pôle boréal magnétique de la terre, ou, du moins, le pôle en question est sur cette verticale. Si, au contraire, on s'éloigne du pôle, on voit l'aiguille se rapprocher de la position horizontale, et, pour une certaine position, plus où moins voisine de l'équateur terrestre, l'aiguille est horizontale, l'inclinaison est nulle; l'ensemble des points pour lesquels l'inclinaison est nulle forme une courbe à peu près circulaire qu'on appelle l'*équateur magnétique* et qui diffère assez notablement de l'équateur géographique. Si l'on franchit l'équateur magnétique pour passer alors dans ce qu'on peut appeler l'hémisphère magnétique austral, on voit l'inclinaison reparaître; mais alors c'est l'extrémité boréale de l'aiguille qui s'incline vers la terre. L'inclinaison va d'ailleurs en augmentant au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, et quand l'aiguille prend la position verticale, sa pointe boréale en bas, on est alors sur la verticale qui passe par le pôle austral de la terre.

A Paris, l'inclinaison est actuellement de 67°; sa valeur est variable comme celle de l'inclinaison, elle est dans une période décroissante.

Procédés d'aimantation. — Il nous reste actuellement à décrire les procédés à suivre pour donner à l'acier l'aimantation.

Lorsqu'on n'a affaire qu'à des aiguilles de petite dimension, on peut employer une méthode très-expéditive appelée *méthode de la simple touche.* Elle consiste à frotter l'aiguille d'acier, toujours dans le même sens, avec l'une des extrémités d'un barreau aimanté. Quant au sens de l'aimantation obtenue, il est aisé à prévoir.

Représentons-nous, en effet, l'aimant AB dans une certaine position sur l'aiguille *ab* (fig. 159); l'action d'influence tend à développer un pôle boréal immédiatement au-dessous du pôle A, et un pôle austral à l'extrémité *a* de la portion *ac*, et à l'extrémité *b* de la portion *cb*. A mesure que l'aimant AB se déplace dans le sens indiqué par la flèche, le pôle boréal unique se déplace avec lui; et quand le pôle A arrive en *b*, il y laisse un pôle boréal.

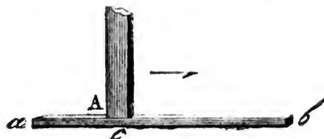


Fig. 159.

Une aiguille d'acier, ayant un degré de trempe déterminée, a par cela même une force coercitive également déterminée; il

en résulte que sa charge magnétique ne peut dépasser une certaine limite. Cette limite atteinte, le barreau est dit aimanté à *saturation*. La simple touche permet rarement d'atteindre la saturation, à moins que l'aiguille n'ait une faible trempe ; et de plus elle a l'inconvénient, si les aiguilles sont un peu longues, d'y faire naître souvent des points conséquents.

La méthode de la double touche, séparée ou réunie, est de beaucoup plus active.

Pour procéder par double touche séparée, on pose les deux pôles contraires de deux forts barreaux aimantés au milieu de la barre d'acier dans laquelle on veut développer l'aimantation,

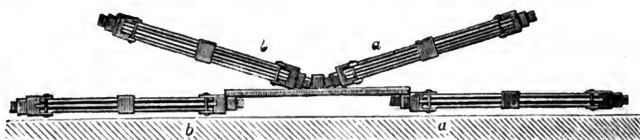


Fig. 160.

en inclinant ses barreaux d'environ 30° sur la barre (fig. 160), puis écartant ces deux barreaux l'un de l'autre, on les amène en glissant jusqu'aux extrémités, pour les reposer ensuite au milieu et recommencer toujours de la même manière, jusqu'à ce que l'on constate que la force du barreau n'augmente plus.

En outre, on ajoute à l'influence des barreaux mobiles celle de deux barreaux fixes sur les pôles desquels reposent les extrémités de la barre comme l'indique la figure.

Duhamel à qui l'on doit cette méthode d'aimantation disposait de plus un second barreau d'acier côte à côte et parallèlement au premier, en unissant leurs extrémités en regard par de petites barres de fer doux de manière à former un rectangle. Pendant que l'un des barreaux s'aimantait sous l'influence simultanée des aimants fixes et des aimants mobiles, les pièces de fer doux s'aimantaient par influence, et réagissaient à leur tour et sur le barreau qui les avait aimantés, pour augmenter sa charge et sur le second barreau dont l'aimantation commençait à se développer. Le premier ayant atteint son maximum de charge, on soumettait le second barreau à son tour au même système de frictions pour compléter son aimantation. La figure 161 qui

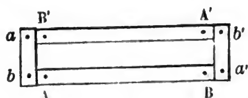


Fig. 161.

montre la disposition relative de ces barreaux fera comprendre aisément leur influence mutuelle en montrant la position des pôles sur les divers barreaux.

Pour procéder par la double touche réunie, on dispose les aimants fixes et les aimants mobiles, exactement de la même manière, et l'on promène alors les barreaux mobiles attachés ensemble un nombre pair de fois sur chacune des moitiés de la barre MN. Ainsi, on va du point milieu en N, puis de N en M, de M en N, et l'on finit par revenir en M, puis au point milieu, alors on enlève les barreaux. Quelle que soit celle des deux méthodes de double touche que l'on emploie, elle développera à l'extrémité vers laquelle se porte le pôle A un pôle boréal, et à l'autre, un pôle austral.

L'expérience a montré que la forme losange était la plus convenable pour les aiguilles de boussole, d'abord en ce qu'elle rend plus facile la lecture des arcs : puis parce que, à dimensions égales, à trempe égale, c'est à cette forme que correspond la plus forte charge magnétique.

On donne souvent aux barreaux la forme d'un fer à cheval, afin de pouvoir utiliser la force attractive des deux pôles sur les substances magnétiques.

Puisque la terre est un aimant et un aimant puissant, elle doit évidemment exercer une action d'influence sur l'acier et sur le fer acérieux pour y développer l'aimantation ; c'est en effet ce qui arrive, et l'on a remarqué qu'un ébranlement mécanique donné à une barre d'acier placée dans la direction la plus favorable à l'aimantation par la terre, c'est-à-dire dans la direction naturelle de l'aiguille aimantée suspendue, accélère l'aimantation et augmente son intensité. Aussi trouve-t-on aimantés la plupart des outils d'acier ou de fer dans l'atelier du serrurier ou du forgeron.

On comprend alors que la position que l'on donne à un barreau aimanté, au repos, ne soit pas indifférente. S'il est dans la direction de l'aiguille aimantée, son pôle austral dirigé vers le nord, la terre ne peut qu'augmenter sa force magnétique, car c'est précisément l'aimantation qu'elle lui donnerait : si, au contraire, son pôle boréal regarde le nord, la terre tendra à affaiblir son aimantation.

Il est d'ailleurs d'autres causes qui peuvent affaiblir le magnétisme des barreaux, surtout les changements de température.

Ainsi Coulomb, qui a, par une méthode fondée sur l'élasticité de torsion des fils métalliques, déterminé les lois qui ré-

gissent les attractions et répulsions magnétiques et électriques, et celles des intensités magnétiques, a constaté également que la force d'un barreau aimanté décroît au fur et à mesure que l'on élève sa température.

Mais il existe un moyen très-simple de soustraire les barreaux à ces causes d'affaiblissement.

Armures. — Il suffit pour cela, de les disposer par paires, parallèlement, et en sens inverse l'un de l'autre, dans une boîte, en appliquant aux extrémités deux petites pièces de fer aussi doux que possible, que l'on appelle *armures*. Il est facile de voir que ces armures s'aimantent par influence, et que les fluides qui s'y développent tendent à maintenir séparés les fluides des barreaux et par conséquent à conserver, même à augmenter leur charge. On reconnaît au surplus dans cette disposition celle que nous signalions tout à l'heure en décrivant la méthode d'aimantation de Duhamel.

Pour les aimants en fer à cheval il suffit d'une armure adaptée aux deux pôles (fig. 162).



Fig. 162.

Lorsqu'on veut avoir des aimants d'une grande force, on réunit en faisceaux plusieurs barreaux de dimensions un peu inégales, en mettant les plus longs au centre, et ayant soin de mettre du même côté tous les pôles de même nom.

Un faisceau pareil est plus fort qu'un barreau unique de même dimension; mais sa force est cependant moindre que la somme des forces des barreaux qui le composent, parce que ces barreaux, agissant les uns sur les autres, par influence, tendent à affaiblir le magnétisme de leurs voisins.

Les aimants en fer à cheval se groupent aussi en faisceaux (fig. 162), et l'expérience a montré que, pour maintenir leur magnétisme, il était bon de suspendre à leur armure une charge qu'on augmente progressivement, autant qu'ils peuvent la supporter.

CHAPITRE XVII.

PILES VOLTAÏQUES.

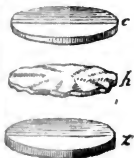
De tous les appareils aptes à produire de l'électricité le plus précieux, et par sa puissance et par la continuité de son action, est sans contredit celui dont Volta a enrichi la science, et auquel, par reconnaissance pour son inventeur, les physiciens ont donné le nom de *pile voltaïque*.

Nous décrirons d'abord l'instrument tel qu'il fut construit dans le principe par le célèbre professeur de Pavie, puis nous passerons en revue les principales formes qu'on lui a données plus tard pour augmenter ou varier ses effets, et enfin nous rapporterons ces effets eux-mêmes et les principales applications pratiques de la pile.



Fig. 163.

Pile à colonne de Volta (fig. 163).— Si l'on pose l'un sur l'autre un disque de zinc et un disque de cuivre se touchant par des surfaces bien propres et bien décapées, de telle sorte qu'aucune substance étrangère ne s'interpose entre les deux métaux pour empêcher leur contact, on a ce que l'on appelle un *couple* de Volta. Pour construire la pile on superpose ces couples disposés invariablement dans le même ordre, en les séparant par des rondelles de drap humectées d'eau acidulée par l'acide sulfurique. Si l'on a mis le premier zinc en dessous, les diverses parties hétérogènes se suc-



céderont dans l'ordre suivant, de bas en haut : zinc, cuivre, drap; zinc, cuivre, drap, et ainsi de suite. On fait alors reposer la pile sur une rondelle de drap posée elle-même sur une lame de cuivre. Si l'on a mis le cuivre en dessous, les éléments seront successivement : cuivre, zinc, drap; cuivre, zinc, drap, etc., et sur le dernier zinc on mettra une rondelle de drap et un cuivre.

Pour monter la pile plus rapidement, et pour rendre en même temps plus intime le contact des deux métaux d'un même couple, on les soude ensemble. On n'a plus alors qu'à superposer les couples, placés tous de la même manière, le zinc en dessus, le cuivre en dessous, par exemple, en les séparant par des rondelles de drap.

Ainsi construite la pile se charge d'elle-même. Si, au moyen d'un arc métallique excitateur, on met les divers points de la colonne en communication avec un électroscope très-sensible, on reconnaît : 1° que la tension électrique est nulle dans le couple qui forme le milieu de la pile ; 2° que l'une des moitiés de la pile, celle qui se termine par un zinc *soudé*, suivi d'un drap et d'un cuivre, est entièrement chargée d'électricité positive dont la tension va en croissant depuis le milieu de la pile jusqu'à l'extrémité ; 3° que l'autre moitié, celle qui se termine par un cuivre *soudé*, est entièrement chargée d'électricité négative dont la tension va aussi en croissant depuis le milieu de la pile jusqu'à l'extrémité.

Le zinc soudé, qui termine la première moitié de la pile et qui offre le maximum de tension positive, transmet par conductibilité l'électricité positive à la rondelle de drap et au cuivre non soudé qu'on a ajoutés à la suite. Cette extrémité de la pile est appelée *pôle positif*.

Le cuivre soudé qui termine la seconde moitié et qui offre le maximum de tension négative s'appelle le *pôle négatif*.

Dans ces conditions, la pile est à l'état de tension ; ses électricités sont à l'état d'équilibre.

Si l'on touche avec l'une des mains le pôle positif, et avec l'autre main le pôle négatif, on éprouve une petite

commotion analogue à celle que produit une bouteille de Leyde faiblement chargée. Une fois le contact établi, ce effet ne se reproduit plus; il est remplacé par une sensation de chaleur, et une espèce de fourmillement dans les doigts; puis, si l'on rompt le contact, la commotion se fait de nouveau sentir. En recommençant autant de fois que l'on voudra, les mêmes phénomènes se reproduisent. Ainsi la pile se recharge continuellement d'elle-même, bien différente en cela de la bouteille de Leyde qui, une fois déchargée, a besoin d'être remise en contact avec la machine électrique pour pouvoir reproduire les mêmes effets.

Volta attribuait le développement de l'électricité au simple contact des métaux hétérogènes, le zinc prenant l'électricité positive, le cuivre l'électricité négative. Il est démontré maintenant que le contact est pour peu de chose dans la production des électricités, et que c'est à l'action chimique des acides sur les métaux qu'il faut l'attribuer; car on n'a point observé encore de cas de production prétendue d'électricité par contact où il n'y eût une action chimique capable d'expliquer cette production. L'expérience a montré que lorsqu'un acide agit sur un métal, l'acide prend l'électricité positive, et le métal l'électricité négative. L'acide sulfurique étendu d'eau agit sur le zinc à la température ordinaire, et non sur le cuivre. Le zinc doit donc prendre l'électricité négative, et l'acide l'électricité positive. Quoique les deux explications attribuent au zinc des électrisations différentes, le résultat définitif n'en est pas moins le même. En effet, si nous considérons les électricités comme se développant à la surface de contact AB (fig. 164), le cuivre c_1 prendra l'électricité négative, et l'électricité positive développée sur le zinc z_1, se répandra par conductibilité au dernier zinc soudé z_2 en franchissant z_1 d, et c_2. Si, au contraire, nous admettons que c'est l'action chimique qui s'exerce à la surface CD qui produit l'électricité, le zinc prenant l'électricité négative, la transmettra

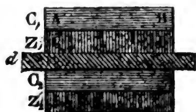


Fig. 164.

par conductibilité à c_1 ; l'acide prenant l'électricité positive la transmettra de même par c_2, au zinc z_2. Nous aurons donc toujours au cuivre terminal soudé c_1 l'électricité négative, au zinc terminal z_2, l'électricité positive.

Lorsqu'on met les deux pôles en communication, soit par les mains, soit par un conducteur métallique, les phénomènes de tension disparaissent. Cependant la pile ne cesse pas de produire de l'électricité, la cause productrice existant toujours, que ce soit le contact ou l'action chimique. Nous savons d'ailleurs, que dès l'instant où cette communication est rompue, la tension reparaît. Nous verrons, en outre, que les conducteurs *interpolaires* deviennent le siége de phénomènes calorifiques, lumineux, chimiques, etc., que l'on ne peut attribuer qu'à l'action de l'électricité. Que deviennent alors ces électricités ? A cet égard, nous ne pouvons faire que des hypothèses. Il est probable que les fluides de noms contraires accumulés aux deux pôles se portent à la rencontre l'un de l'autre sur le conducteur et se recombinent sur toute l'étendue du fil, et qu'en même temps les surfaces productrices d'électricité reproduisent incessamment les fluides qui se portent vers les pôles et s'écoulent par le conducteur. Cela revient à admettre l'existence d'une double circulation continue : courant de fluide positif allant, dans le fil *interpolaire* du pôle positif au pôle négatif, et dans la pile, au contraire du pôle négatif au pôle positif; courant de fluide négatif allant, dans le fil interpolaire du pôle négatif au pôle positif, et dans la pile du pôle positif au pôle négatif.

Comme ces deux fluides sont doués de propriétés antagonistes, s'ils circulaient de la même manière dans le fil, ils détruiraient mutuellement leurs effets; mais comme ils circulent en sens inverse, alors leurs effets se trouvent être les mêmes. Aussi ne considère-t-on jamais que le courant positif, et l'on appelle proprement *courant de la pile* la route fictive suivie par le fluide positif, du pôle positif au pôle négatif dans le conducteur interpolaire, du pôle négatif au pôle positif de la pile.

La pile de Volta avait de graves inconvénients; elle est assez longue à monter. En outre, ses effets décroissent rapidement d'intensité. En voici la cause principale : la pression des disques superposés exprime des rondelles la liqueur acide et la fait suinter le long de la pile. Il en résulte une diminution dans la conductibilité intérieure de la pile et dans l'action chimique, et en outre le liquide qui coule à la surface extérieure de la colonne produit l'effet de conducteurs interpolaires, et tend à décharger la pile en offrant aux fluides une autre route que le fil métallique qui réunit les pôles. Ainsi, quand la pile sera isolée, il y aura diminution de tension aux pôles; et, quand les pôles seront en communication par un fil, diminution dans l'énergie du courant. Aussi en modifiant dans sa forme la pile de Volta, a-t-on cherché, autant que possible, à faire disparaître cette conductibilité extérieure et à augmenter, au contraire, la conductibilité intérieure en même temps que l'étendue des surfaces sur lesquelles s'opère l'action chimique.

Pile à tasses. — Une disposition très-simple, et facile à reproduire sans grands frais, est celle de la *pile en couronne* ou *pile à tasses*.

On prend des lames de zinc et de cuivre que l'on soude deux à deux, en les disposant en forme de V, l'une des branches du V étant formée par la lame de zinc, l'autre par la lame de cuivre. On dispose ensuite en cercle des tasses à demi pleines d'eau acidulée, en nombre égal aux couples métalliques, de telle sorte que la première tasse reçoive le zinc du premier couple, la seconde tasse le cuivre du premier couple et le zinc du second, la troisième tasse le cuivre du second couple et le zinc du troisième, et ainsi de suite; la dernière tasse recevant le cuivre de l'avant-dernier couple et le zinc du dernier. Si l'on faisait maintenant plonger le cuivre de ce dernier couple dans la première tasse, le circuit se trouverait formé par la pile elle-même; mais on ajoute ordinairement une tasse en plus, dans laquelle on fait plonger ce dernier cuivre. Cette tasse formera le pôle négatif de la

pile tandis que la première forme le pôle positif. Pour établir la communication entre les pôles par les mains, on n'aura qu'à plonger les doigts de l'une des mains dans la première tasse, et les doigts de l'autre main dans la tasse supplémentaire. Pour établir la communication par un fil métallique, il faudra plonger dans ces mêmes tasses les extrémités de ce fil.

Pile à auges (fig. 165). — On emploie assez fréquemment la *pile à auges*. Elle est formée d'une caisse rectangulaire en bois, mastiquée à l'intérieur, et partagée en cases par des cloisons verticales et parallèles, composées chacune de deux métaux, zinc et cuivre, accolés toujours

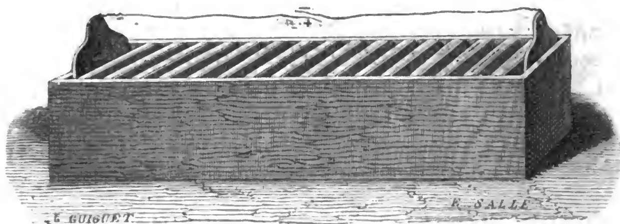


Fig. 165.

dans le même ordre, de telle sorte que la paroi droite de l'une des cases soit formée par un zinc par exemple, et la paroi gauche par un cuivre. Il suffit de verser de l'eau acidulée dans l'auge, de manière à remplir tous les compartiments, sans cependant que le liquide déborde par-dessus les cloisons.

C'est, comme on le voit, la pile de Volta couchée horizontalement. La case extrême qui a pour paroi métallique le dernier zinc représente le pôle positif; l'autre case extrême est le pôle négatif. Cette pile est d'un usage commode par la rapidité avec laquelle elle se met en activité; mais elle a, comme la pile à colonne, cet inconvénient, que le contact du zinc avec l'acide sulfurique ne

se fait que sur une des faces du métal, inconvénient que n'offre pas la pile à tasses.

Pile de Wollaston (fig. 166). — Wollaston a alors apporté à cette dernière la modification suivante : il a plié chacune des lames de cuivre de manière à lui faire envelopper le zinc de l'élément suivant sans le toucher, puis il a fixé ses couples par leur partie supérieure à une traverse en bois soutenue par deux supports verticaux, entre lesquelles elle peut monter ou descendre; de telle sorte que lorsque l'on veut suspendre pour un moment l'action de la pile, et préserver, pendant cette interruption, les métaux de l'action corrosive des acides, on n'a

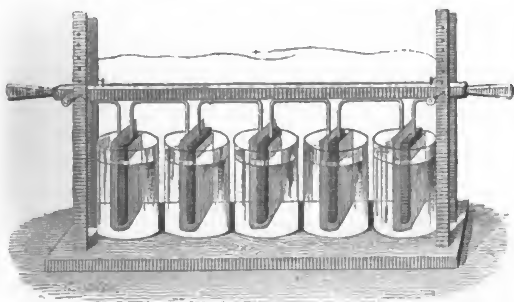


Fig. 166.

qu'à relever la traverse et sortir ainsi les couples de leurs bocaux.

Nous avons à une des extrémités de la pile un ruban de cuivre soudé à un zinc, c'est là le pôle négatif. Nous le marquons sur la figure par le signe—. A l'autre extrémité, nous avons une lame de cuivre qui enveloppe le zinc du dernier couple sans le toucher, et qui prend au liquide acide son électricité; c'est là le pôle positif, marqué du signe +.

Les bocaux sont remplis avec de l'eau, que l'on rend acide en y ajoutant à peu près un dixième de son poids d'acide sulfurique, et un vingtième d'acide nitrique.

Il existe encore d'autres dispositions, telles que la *pile*

en *hélice*, la *pile de Munch*, celle de *Faraday*, etc. Nous renvoyons pour leur description aux traités plus complets de M. Pouillet ou de M. Becquerel.

Pile à deux liquides. — Toutes les piles voltaïques que nous venons de passer en revue ont ce caractère commun que les deux métaux qui composent les couples sont en contact avec le même liquide acide. Elles peuvent présenter une grande énergie d'action, mais cette énergie n'est pas durable. Ce décroissement d'intensité est du à diverses causes, telles que l'affaiblissement progressif des liqueurs acides, la formation de substances salines résultant de l'action des acides sur les métaux, et le dépôt de ces substances sur les plaques ; ces dépôts, comme on l'a constaté, font naître dans le circuit fermé de la pile des courants de sens contraire au courant principal et qui affaiblissent son intensité. On n'a obtenu des effets constants, au moins pendant un temps un peu long, qu'en mettant l'un des métaux en contact avec un certain liquide, l'autre métal avec un liquide différent en choisissant ces liquides de telle sorte qu'ils puissent dissoudre les dépôts ou les empêcher de se former. Il serait superflu d'entrer dans aucun développement théorique sur le mode d'action de ces piles à deux liquides, d'autant mieux que pour un bon nombre il règne encore une assez grande obscurité sur la cause productrice de l'électricité. Nous nous contenterons de décrire celles qui sont le plus souvent employées en France, la *pile de Daniell* et celle de *Bunsen*.

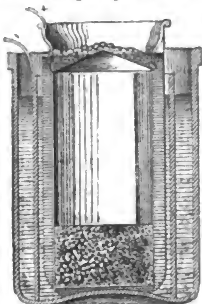


Fig. 167.

L'élément de Daniell (fig. 167) se compose d'un cylindre de cuivre creux et lesté de sable à sa partie inférieure. Il est surmonté d'une partie évasée, formant une espèce d'entonnoir. Sur le rebord en saillie est fixée une membrane ou un sac en toile à voile à tissu serré qui enveloppe complétement le cylindre. De petits trous sont percés sur

le bord de l'entonnoir et communiquent avec l'espace qui sépare la paroi de cuivre du sac. On verse dans l'entonnoir une dissolution saturée de *sulfate de cuivre* (*vitriol bleu* ou *couperose bleue du commerce*), qui descend alors dans le sac en débordant dans l'entonnoir, et l'on ajoute par dessus quelques cristaux de sulfate pour maintenir constamment la liqueur saturée. On plonge ensuite le cylindre dans un bocal contenant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, ou bien encore une dissolution saturée de sel marin. Dans cette liqueur trempe une lame de zinc repliée en cylindre et portant un fil de cuivre *n* soudé en un point de son bord supérieur; un autre

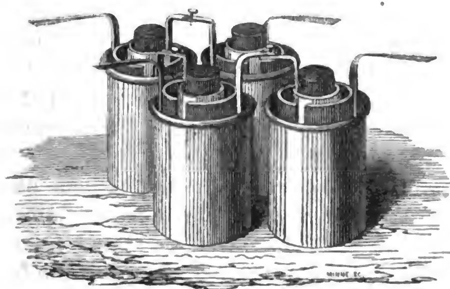


Fig. 168.

fil de cuivre *p* est soudé de la même manière à l'entonnoir en cuivre. Ce dernier fil est le pôle positif de l'élément; l'autre est son pôle négatif Pour grouper ensemble les éléments et en former une pile, on réunit par une pince métallique le fil positif de chaque élément avec le fil négatif de l'élément suivant. Le fil cuivre, soudé au cuivre, et resté libre à l'une des extrémités de la série, est le pôle positif de la pile; le fil cuivre, soudé au zinc, et resté libre à l'autre extrémité de la série, est le pôle négatif.

Dans l'élément de Bunsen (fig. 168), le cylindre de cuivre, plongeant dans le sulfate de cuivre, est remplacé par

un bâton de charbon[1] immergé dans de l'acide azotique concentré ; et au lieu d'un sac de toile ou d'une membrane pour séparer les deux acides, on emploie un vase en terre poreuse, comme la terre à pipe ou la porcelaine dégourdie et sans couverte vitreuse. Ainsi, les diverses pièces qui composent l'élément se succèdent dans l'ordre suivant, de l'extérieur à l'intérieur : bocal en verre ou en faïence, zinc avec eau acidulée, vase poreux, charbon avec acide azotique. Quelquefois, on met dans le vase poreux le zinc avec l'eau acidulée, et l'on met alors dans le bocal extérieur l'acide azotique avec le charbon, qui a, dans ce cas, la forme d'un tube cylindrique. Un fil de cuivre soudé au zinc forme le fil négatif; un autre fil fixé au charbon forme le fil positif. On groupe les éléments comme pour la pile de Daniell. Le dernier fil fixé au charbon est le pôle positif ; le fil soudé au zinc est le pôle négatif.

Effets de la pile. — Nous diviserons les effets produits par la pile en effets physiologiques, effets physiques et effets chimiques.

1° *Effets physiologiques.* Nous avons déjà parlé de la commotion que l'on ressent lorsque l'on établit la communication entre les pôles avec les mains. Cette commotion ne se manifeste qu'au moment où a lieu le contact, et au moment où il cesse. Mais pendant la durée du passage continu du courant, elle ne se produit plus. Cette commotion est d'autant plus intense que le nombre des éléments de la pile est plus considérable. Ainsi, une pile à colonne de 150 à 200 couples, qui ne produit que de faibles effets calorifiques ou lumineux, donne des secousses très-marquées dans les articulations des doigts et du poignet; tandis qu'une pile de Wollaston ou de Bunsen de 10 éléments, avec laquelle on peut fondre des fils de platine, ne donne point de commotions sensibles. Ces

1. On trouve dans les cornues qui servent à la préparation du gaz d'éclairage, et qui ont déjà un long usage, un dépôt adhérent d'un charbon excessivement dur, qui a l'aspect métallique : c'est ce charbon qui, taillé à la scie en prismes allongés, est employé pour les piles de Bunsen.

effets sont surtout très-marqués quand on a les mains humides, et surtout quand elles sont imprégnées d'eau acidulée, l'épiderme sec étant un assez mauvais conducteur du fluide électrique. Les contractions musculaires ne se produisent pas seulement sur les parties du corps vivant; elles se manifestent aussi sur le cadavre; pourvu que la mort soit récente. Ainsi, en mettant à découvert un cordon nerveux du bras ou de la jambe, et posant le fil positif à la naissance du nerf; c'est-à-dire au point le plus rapproché de la moelle épinière, on verra qu'au moment où l'on fait toucher par le fil négatif l'extrémité terminale du nerf, le membre éprouve une contraction. En employant une pile énergique, on peut obtenir des mouvements considérables et donner au cadavre l'apparence de la vie. En faisant passer le courant dans les nerfs qui se rendent aux muscles de la poitrine, on reproduit artificiellement les mouvements d'aspiration et d'expiration, et dans nombre de cas, la pile est devenue un auxiliaire puissant pour rétablir la respiration chez des personnes asphyxiées et les rappeler à la vie. Quelquefois aussi, des commotions répétées dans une certaine région du système nerveux, affectée d'atonie ou de paralysie, ont pu y faire renaître la sensibilité et le mouvement, il faut, dans ce cas, placer dans le courant un appareil interrupteur, comme, par exemple, une roue métallique dentée communiquant par son axe avec l'un des fils, et touchant par ses dents à l'extrémité de l'autre fil. On pourra ainsi donner, par la rotation de la roue, un très-grand nombre de commotions dans un petit intervalle de temps, de manière à graduer à volonté l'énergie de l'effet produit.

2° *Effets physiques.* Si l'on attache aux deux cuivres d'un seul élément de Wollaston, dont le zinc ait environ 2 décimètres carrés de surface, un fil très-fin de platine, ce fil, par le passage du courant, s'échauffe au point de devenir rouge. En prenant, au lieu d'un seul élément, une pile de 10 à 12 éléments, soit de Wollaston, soit de Bunsen, on pourra alors fondre des fils de plus grande dimension en les attachant aux extrémités des conduc-

teurs. Avec une pile de Bunsen de 50 éléments, on fondra des tiges de fer, d'acier, des fils de platine de plusieurs millimètres de diamètre. L'effet calorifique produit sur un fil par un même courant est d'autant plus marqué que le diamètre de ce fil est plus petit, que sa longueur est aussi plus petite, et que la substance qui le compose conduit moins bien le fluide électrique. Aussi doit-on prendre pour *réophores* (fils qui apportent les électricités des pôles) des fils de cuivre d'un diamètre d'autant plus fort que la pile est plus puissante, si l'on ne veut pas que ces fils s'échauffent au point de ne pouvoir être tenus dans les mains. Remarquons bien que ces piles de 50 éléments, qui déterminent la fusion du platine, le métal le plus réfractaire à la chaleur parmi les métaux usuels, ne produisent aucune commotion sur la personne qui prend les réophores.

Au moment où on met en contact les deux réophores pour fermer le courant, ou bien encore lorsqu'on les sépare, une petite étincelle jaillit au point de contact. Elle est verdâtre avec des réophores en cuivre, rouge quand on emploie des réophores en fer; enfin, sa couleur et son aspect changent avec la nature des métaux que l'on emploie pour réophores, ce qui prouve qu'il y a des parcelles métalliques entraînées dans le courant et même volatisées. Pour produire le phénomène d'une manière brillante, on prend une lime en acier ou en laiton, on fait toucher l'un des réophores à la base de la lime, et avec l'autre main on promène le second réophore sur les aspérités de la surface, de manière à multiplier les interruptions du courant, on obtient ainsi de véritables gerbes d'étincelles.

Le courant peut passer même entre des conducteurs placés à petite distance lorsqu'on emploie une pile énergique. Adaptons aux extrémités de nos réophores deux charbons de cornue taillés en cône effilé, et rapprochons ces charbons jusqu'au contact, de manière à fermer le courant ; éloignons-les alors petit à petit l'un de l'autre, le courant continuera à passer entre les deux pointes sé-

parées sous forme de ligne lumineuse continue. Au delà d'une certaine distance, d'autant plus grande que la pile est plus puissante, le courant cesse de passer et la lumière s'éteint tout à coup. Ce phénomène remarquable se produit également bien dans l'air, dans le vide et dans l'eau. Avec une pile de 600 couples la ligne lumineuse peut atteindre une longueur de plusieurs centimètres.

La lumière qu'on obtient ainsi a un éclat éblouissant qui fait pâlir toutes nos lumières artificielles. Il n'y a guère que la lumière de *Drummond*, obtenue en lançant un jet enflammé de gaz oxygène et hydrogène mélangés sur la chaux, qui puisse lui être comparée. On l'a déjà employée à plusieurs reprises sur nos grands théâtres pour imiter la lumière du soleil. Comme les charbons s'usent rapidement dans l'air, surtout le charbon positif, on a imaginé de petits appareils régulateurs qui font mouvoir les charbons au fur et à mesure qu'ils se consument, de manière à maintenir leurs pointes toujours à la même distance.

Aux effets physiques produits par la pile se rattachent les phénomènes d'aimantation et les télégraphes électriques ; nous rejetterons ce paragraphe à la fin du chapitre pour ne point interrompre l'exposé des phénomènes principaux produits par l'action de la pile.

3° *Effets chimiques.* En parlant de la machine électrique et de la bouteille de Leyde, nous avons dit que l'électricité qu'elles fournissent produit des phénomènes de combinaison et de décomposition. La pile est un agent chimiquc bien plus puissant encore.

Pour ne point empiéter sur les différents faits exposés dans le cours de chimie de seconde, nous donnerons simplement la décomposition de l'eau, de l'alcali et d'un sel.

Pour décomposer l'eau, on se sert d'un petit appareil très-simple, composé d'un verre percé en son fond de deux trous par lesquels passent deux fils de platine fixés avec du mastic (fig. 169). On remplit le verre avec de l'eau rendue conductrice à l'aide d'une petite quantité d'acide sulfurique. On dispose, au-dessus de chaque fil, une pe-

tite cloche longue et étroite divisée en parties d'égale capacité. On fait alors communiquer les réophores de la pile avec les fils de platine. Dès que les contacts sont établis, on voit des bulles nombreuses et très-petites se dégager tout autour des fils et monter dans les éprouvettes. Le gaz qui se rassemble dans l'éprouvette placée au-dessus du fil négatif occupe toujours, à un instant quelconque, un volume double de celui que présente au même instant le gaz recueilli dans l'éprouvette positive. Le premier gaz s'enflamme au contact d'une bougie allumée et brûle avec une flamme pâle; c'est de l'*hydrogène*. L'autre gaz a la propriété de rallumer instantanément une allumette à demi éteinte, mais présentant encore quelques points en ignition; c'est de l'*oxygène*. Ces deux gaz sont les éléments constituants de l'eau [1].

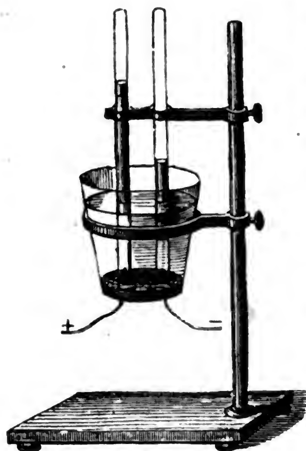


Fig. 169.

Prenons maintenant un morceau un peu épais de *potasse* légèrement humectée, et creusons-y une petite cavité où nous mettrons une goutte de mercure; puis plaçons-le sur une lame de platine mise en communication avec le fil positif d'une pile puissante (fig. 170). Il ne restera plus, pour obtenir la décomposition de la potasse, qu'à plonger le fil négatif dans le mercure. La potasse se décompose en deux élé-

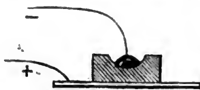


Fig. 170.

1. Ce petit appareil est connu dans la science sous le nom de *voltamètre*.

ments : l'oxygène qui se porte sur la lame positive de platine et se perd dans l'air, ce métal n'étant pas oxydable; et le *potassium*, qui se porte au pôle négatif et s'amalgame avec le mercure.

La potasse est donc comme l'eau un composé binaire, dont l'oxygène est l'un des éléments; c'est ce que l'on appelle dans le langage chimique un *oxyde*.

Nous voyons dans ces deux décompositions l'oxygène se porter au pôle positif. On le considère alors comme électrisé négativement par le fait même de la décomposition; il va reprendre au pôle positif le fluide positif nécessaire pour le reconstituer à l'état neutre. Le potassium et l'hydrogène sont considérés, au contraire, comme électrisés positivement. On donne généralement le nom de corps *électro-négatifs* aux corps qui se portent ainsi au pôle positif, et le nom de corps *électro-positifs* à ceux qui se rendent au pôle négatif.

On appelle, en chimie, *sel*, le produit de la combinaison d'un principe rougissant la teinture de tournesol et le sirop de violettes, doué d'une saveur aigre et piquante, qui lui fait donner le nom générique d'*acide*, avec une substance verdissant le sirop de violettes, ramenant au bleu le tournesol rougi, neutralisant les propriétés des acides et appelée une *base*. La pile sépare ces deux principes du sel, comme le prouve l'expérience suivante. On met dans un tube, recourbé en forme de V, une dissolution d'un sel, le *sulfate de soude*, par exemple (acide sulfurique et soude); on teint la dissolution en y versant quelques goutes de sirop de violettes. On établit alors une lame de platine dans chacune des branches du tube et l'on fait communiquer l'une d'elles avec le pôle positif de la pile, et l'autre avec le pôle négatif. On voit bientôt le sirop de violettes verdir autour de cette dernière lame, tandis qu'il rougit dans l'autre branche. L'acide est donc l'élément électro-négatif du sel, et la base l'élément électro-positif.

L'action chimique de la pile a reçu dans les arts une application importante. Elle est mise en usage pour for-

mer des dépôts métalliques de cuivre, d'or ou d'argent. à la surface des corps conducteurs, prendre des empreintes de médailles, etc.

Galvanoplastique. — S'agit-il, par exemple, de recouvrir d'un dépôt adhérent de cuivre un objet quelconque, métallique ou non; si l'objet est métallique, et par conséquent conducteur, on se borne, comme opération préparatoire, à mettre sa surface parfaitement à nu, en enlevant les dépôts étrangers d'oxydes ou de matières grasses, qui pourraient le couvrir, par quelques immersions dans des bains d'acide sulfurique et d'acide nitrique convenablement préparés. C'est ce que l'on appelle le *décapage*. Si l'objet n'est pas conducteur, on commence par rendre sa surface conductrice, en la recouvrant d'une couche de plombagine ou de bronze florentin. La pièce préparée de cette manière est attachée au réophore négatif de la pile; en même temps on attache au réophore positif une lame de cuivre de dimension proportionnée à celle du corps à couvrir du dépôt galvanoplastique, et l'on plonge alors les deux réophores ainsi armés dans une dissolution saturée de sulfate de cuivre. Le sel est décomposé par le courant, qui sépare l'acide et la base, et de plus décompose l'oxyde de cuivre; le cuivre se porte au réophore négatif et se dépose en couche adhérente sur l'objet attaché à ce réophore; l'acide et l'oxygène vont au réophore positif, et là, rencontrant la lame de cuivre, forment du sulfate de cuivre qui remplace celui que le courant a décomposé.

Pour déposer une couche d'argent ou d'or, il faudrait substituer au sel de cuivre un bain formé de cyanure d'argent dissous dans le cyanure de potassium, ou de chlorure d'or dissous dans le même cyanure alcalin ou dans le carbonate de potasse. En même temps on remplacerait au réophore positif la lame de cuivre par une lame d'argent ou une lame d'or.

La reproduction des médailles se fait de la même manière; seulement il faut empêcher le dépôt métallique d'adhérer à la médaille ou au moule métallique. On y arrive en passant rapidement cette médaille ou ce moule dans la fumée d'un corps résineux. Les moules ou empreintes en creux de la médaille se font, soit avec l'alliage fusible de Darcet, soit avec du plâtre, du soufre ou de la stéarine; c'est pour ces derniers qu'il est besoin de métalliser la surface avec une couche de plombagine ou de bronze.

Il est d'ailleurs facile de se dispenser de l'emploi d'une pile.

L'appareil galvanoplastique est souvent construit de manière à fournir le courant nécessaire pour la décomposition électrochimique.

On prend pour cela un vase cylindrique en porcelaine poreuse, haut de $0^m,20$, large de 1 décimètre, ou encore un cylindre en verre de cette même dimension, fermé à l'un de ses bouts par une membrane de vessie, et portant à moitié de sa hauteur un collier à trois pattes horizontales. Puis on a un bocal en verre notablement plus large, mais à peu près de la même hauteur, et sur les bords duquel posent les trois pattes du cylindre précédent, qui se trouve suspendu dans son intérieur. On dispose à côté de cet appareil une potence dont la traverse horizontale est en laiton et le pied en bois. On accroche alors à la potence un fil de cuivre portant une petite masse de zinc, qu'on fait descendre dans le vase intérieur contenant de l'eau acidulée; et l'on dispose un second fil de cuivre portant la matrice que l'on suspend dans le vase extérieur, plein de sulfate de cuivre, immédiatement au-dessous du fond du premier vase.

4° *Électro-aimants. — Télégraphes électriques.* — Lorsqu'on fait passer un courant dans un fil de cuivre voisin d'une aiguille aimantée mobile, l'aiguille est déviée de sa position d'équilibre et tend à prendre une position perpendiculaire à la direction du fil, telle que si l'observateur se supposait couché sur le fil, de manière que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête, il aurait, en regardant l'aiguille, le pôle austral à sa gauche. Ce fait, découvert par Œrsted, est devenu pour Ampère le point de départ d'une des plus belles théories de la physique moderne, théorie qui rattache les phénomènes du magnétisme à ceux de l'électricité, et qui explique toutes les propriétés des aimants par l'action de courants électriques circulant à leur surface.

Cette théorie de l'électro-magnétisme ne faisant point partie du programme de notre cours, nous la laisserons, à regret, de côté, nous bornant à énoncer un fait important qui peut être considéré comme découlant immédiatement de l'expérience d'Œrsted.

Si l'on met en croix, sur un fil de cuivre, une aiguille d'acier ou de fer doux, et si l'on fait passer un courant dans ce fil, immédiatement l'aiguille se trouve aimantée, et son pôle austral apparaît à la gauche du courant; en appelant ainsi la gauche de l'observateur qui se supposerait couché sur le fil lui-

même, la face tournée vers l'aiguille, et placé de telle sorte que le courant traverse son corps des pieds à la tête. Cette aimantation ne dure, dans le fer doux, qu'autant que le courant continue de passer dans le fil ; est-il interrompu, aussitôt le fer revient à l'état neutre ; dans l'acier, au contraire, l'aimantation persiste après la rupture du courant.

Si l'on enroule autour d'un barreau de fer un fil de cuivre enveloppé de soie, pour que les tours de fil ne se touchent point

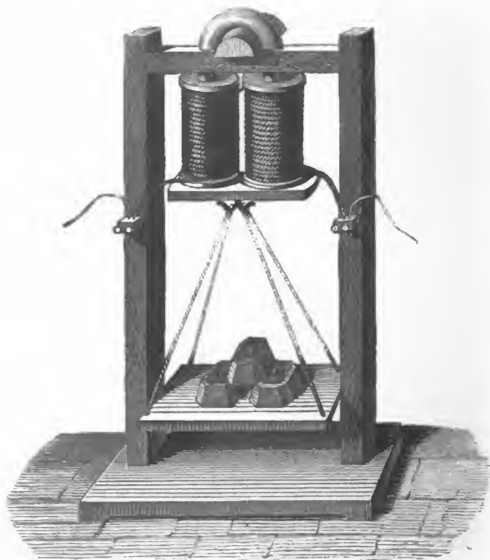
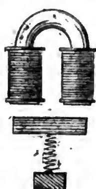


Fig. 171.

et ne touchent point au fer, et si l'on fait communiquer les extrémités de ce fil avec les pôles d'une pile, les différentes portions enroulées et traversées par le courant ont toutes leur gauche du même côté, conséquemment leurs effets s'ajoutent ; aussi, à l'instant même, le barreau devient un aimant puissant, et si le courant cesse de passer, cet état d'aimantation cesse aussi immédiatement. On désigne ces aimants passagers sous le nom d'*électro-aimants*. On leur donne ordinairement la forme d'un fer à cheval (fig. 171), et les bobines de fil enroulé

enveloppent les deux branches. Ils peuvent avoir une puissance énorme si la pile est un peu forte et la longueur du fil enroulé considérable. Ainsi avec 40 éléments de Bunsen, on donnera facilement à un électro-aimant une force capable de porter 5 ou 600 kilogrammes.

Supposons actuellement un électro-aimant en fer à cheval, ayant, en face de ses pôles et à une petite distance, une pièce en fer, retenue par un ressort qui la ramène à sa position quand on cherche à la rapprocher des extrémités du fer à cheval (fig. 172). Lorsque l'on fera passer le courant dans la double bobine, le fer à cheval, devenu aimant, vaincra facilement la résistance du ressort, et appellera à lui la petite pièce de fer qui viendra s'appliquer sur ses pôles. Mais dès qu'on ouvrira le circuit, l'aimantation disparaîtra et le ressort ramènera le fer à sa place primitive. En renouvelant autant de fois que l'on voudra le passage et l'interruption du courant, on obtiendra un mouvement de va-et-vient; et ce mouvement se produira lors même que les fils qui rattachent la pile à l'électro-aimant auraient 100 mètres, 1000 mètres et plus de longueur, pourvu qu'on augmente leur diamètre en même temps que leur longueur.


Fig. 172.

C'est là le principe de la construction de presque tous les télégraphes électriques. Il n'y a guère de différence entre eux que dans le mode d'écriture et de lecture des dépêches. Nous ne décrirons que le télégraphe à cadran, tel à peu près qu'il est employé par l'administration des chemins de fer.

Ce télégraphe se compose d'une pile de Daniell ou de Bunsen, de deux appareils, l'un pour écrire la dépêche et qu'on appelle *manipulateur*, l'autre qui la donne à lire exactement telle qu'elle a été écrite, et qui porte le nom de *récepteur;* enfin du circuit métallique qui rattache ces divers appareils. Chaque station télégraphique possède à la fois un manipulateur et un récepteur que l'on peut introduire à volonté dans le circuit appartenant à la même pile.

Le récepteur (fig. 173) se compose d'un cadran vertical portant sur son contour les vingt-cinq lettres de l'alphabet, plus un signe servant de point de repère et placé devant l'A, au sommet du cadran. Une aiguille *f* fixée au centre d'une roue peut parcourir ce cadran ; la roue qui la porte présente vingt-six dents inclinées. Une pièce métallique en forme d'Y est dis-

posée au-dessous de cette roue et porte aux extrémités de ses branches deux petites baguettes cylindriques, destinées à engrener l'une après l'autre avec les dents de la roue. Cet Y, mobile autour d'un pivot placé à sa base, est mis en mouvement par un levier coudé *l*, mobile autour de son extrémité inférieure, et qui porte un peu au-dessus de ce centre de rotation, une petite pièce de fer ou *armure*, placée en face des pôles d'un électro-aimant *g*; un petit ressort attaché à cette armure la rappelle en arrière. Enfin l'une des extrémités du fil de l'électro-aimant communique au pôle positif de la pile; l'autre extrémité s'attache au fil qui va rejoindre le manipulateur.

Supposons que le courant passe dans les bobines; l'armure

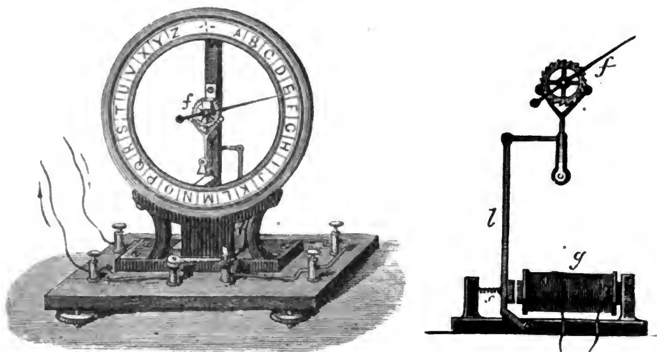


Fig. 173.

est appelée contre les pôles et pousse alors le levier. La baguette droite se dégage et la baguette gauche vient pousser contre la roue en la faisant avancer d'une demi-largeur de dent. Puis quand le circuit sera ouvert, le levier rappelé par le ressort dégagera la baguette gauche en engageant la droite, qui, venant à son tour heurter contre une dent, la fera avancer d'une demi-largeur. Les deux mouvements auront donc fait avancer une dent de toute sa largeur; par conséquent l'aiguille du cadran aura passé d'une case à la suivante, puisqu'il y a autant de dents à la roue que de cases au cadran. Avec 10 passages du courant et 10 interruptions successives, on fera passer l'aiguille de la lettre A à la lettre K, ou de B à L, ou de C à M., etc.; enfin d'une lettre quelconque à la 10e lettre qui la suit.

Le manipulateur (fig. 174) placé à l'autre station est destiné à produire ces alternatives dans le passage et l'interruption du courant. Nous le réduirons à sa plus grande simplicité. Supposons une roue en cuivre portant aussi vingt-six dents sous lesquelles sont écrites également les lettres de l'alphabet et le signe de repère. L'axe métallique de cette roue, porté sur des supports isolants en ivoire, reçoit le fil positif de la pile par l'intermédiaire du récepteur. Le fil négatif qui vient de cette même pile présente son extrémité aux dents de la roue. Chaque dent qui passe sur le fil produit une fermeture du circuit, puis une interruption lorsqu'elle est passée. Si donc l'aiguille du récepteur étant sur le signe de repère, et la dent de repère du manipulateur en avant du fil, on fait passer six dents de la roue sur ce fil, de manière à amener la lettre F en avant du fil, il y aura eu six passages et six interruptions du courant, par conséquent l'aiguille du récepteur aura marché de six cases sur son cadran et sera aussi devant l'F. En faisant passer l'O du manipulateur en avant du fil, le mouvement de rotation se continuant dans le même sens, l'aiguille du récepteur se portera sur l'O, et ainsi de suite pour toutes les autres lettres de la dépêche. Pour envoyer la réponse, à la station d'arrivée on sortira le récepteur du circuit pour y engager à la place le manipulateur, tandis qu'à la station de départ on remplacera, au contraire, le manipulateur par le récepteur, et la même pile comme le même circuit pourront servir à la transmission.

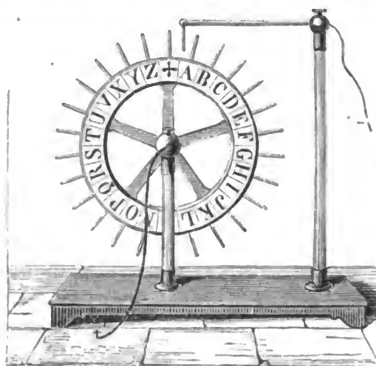


Fig. 174.

La vitesse de transmission de l'électricité dans les fils conducteurs est tellement grande, qu'il n'y a guère d'autre retard que le temps de l'écriture et celui de la lecture. Il y a simultanéité presque complète entre les mouvements du manipulateur et ceux du récepteur, quand les distances ne sont pas par trop considérables.

CHAPITRE XVIII.

DE LA LUMIÈRE. — RÉFLEXION. — RÉFRACTION. DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

On donne le nom de *lumière* à l'agent, quel qu'il soit, qui nous rend les objets visibles. L'optique est la partie de la physique qui a pour but l'étude des phénomènes produits par la lumière.

Un certain nombre de corps sont lumineux par eux-mêmes, les autres ne le sont que parce qu'ils sont éclairés par les corps lumineux. Parmi les corps non lumineux, il en est qui ne se laissent point traverser par la lumière ; on les appelle *corps opaques*. Les autres, ou bien laissent passer la lumière sans cependant nous permettre de distinguer la forme des objets, ou bien nous laissent la vue complète de tout ce qui se trouve derrière. Les corps qui sont dans le premier cas, comme le papier huilé, le verre dépoli , s'appellent corps *translucides*. Les derniers, comme l'air, l'eau, le verre, etc., sont des corps *transparents*.

La transparence et l'opacité absolues ne se rencontrent point dans les corps. Ainsi la lumière, en traversant une grande épaisseur d'air, d'eau ou de verre, perd de son intensité, ce qui indique qu'une portion a été éteinte dans le corps. Une feuille d'or excessivement mince laisse au contraire passer la lumière.

Propagation rectiligne de la lumière. — Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite. On le démontre en prenant deux cartons percés chacun d'un trou circulaire, de même dimension pour les deux. Deux points déterminent complétement une droite. Si l'on place une bougie sur la direction rectiligne qui passe par ces deux trous, l'œil placé devant le premier écran aper-

cevra la flamme ; mais si la bougie s'écarte de cette ligne droite, de quelque manière que ce soit, l'œil cesse immédiatement de l'apercevoir.

On appelle *rayon* la route rectiligne suivie par la lumière en passant d'un point lumineux a un point quelconque de l'espace.

Il est bien entendu, d'ailleurs, que quand nous parlerons des effets produits par les rayons lumineux, nous attribuerons ces effets à la lumière qui se propage suivant leur direction.

Ombre et Pénombre. — De ce que la lumière se propage en ligne droite, il résulte que si sur le passage des rayons qu'un point lumineux envoie dans toutes les directions, on place un corps opaque, les rayons qui se trou-

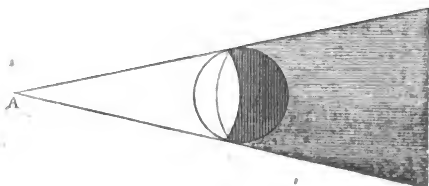


Fig. 175.

vent compris dans le cône qui embrasse le corps, et a son sommet au point lumineux A (fig. 175), seront interceptés par ce corps. Dès lors, la portion de ce cône, ainsi que la portion du corps qui se trouve au delà de la ligne de contact, ne pourront recevoir de lumière et seront dans l'*ombre*. Les limites de l'ombre ne sont jamais aussi nettement tranchées que nous venons de le dire, parce que la source de lumière n'est pas un point géométrique, mais un corps offrant des dimensions plus ou moins considérables. Il en résulte que l'ombre complète et la partie de l'espace complétement éclairée, sont séparées par une zone de dégradation insensible qu'on appelle la *pénombre*, et qui est d'autant plus étendue que le corps lumineux est plus rapproché du corps opaque.

Pour nous rendre compte de la formation de la pénombre, supposons la sphère opaque éclairée simultanément par deux points lumineux A et B (fig. 176), le cône dont le sommet est en A dessine sur la sphère une ligne circulaire de contact *aca'*.—De même le cône dont le sommet est B a aussi sa ligne de contact *bcb'*. Si nous considérons maintenant la portion de la surface de la sphère en arrière de *acb'*, elle est évidemment dans l'ombre complète; car, étant à la fois en arrière des deux lignes de contact, elle ne reçoit de lumière ni du point A, ni du point B. Au contraire, la partie de cette surface, située en avant de *bca'*, est éclairée à la fois par les deux points; mais si nous prenons l'espèce de fuseau dont la partie visible est *bca*, nous voyons que cette partie de surface est en arrière de la ligne de contact *bcb'*, mais en avant de la ligne de contact *aca'*, elle est donc éclairée par A, mais ne l'est pas par B. Au contraire, *a'cb'* l'est par B et ne l'est pas par A. Ainsi, sur la surface même de la sphère opaque, les espaces *acb*, *a'cb'* nous représentent les portions visibles de la pénombre. — De même dans l'espace en arrière du corps opaque, l'étendue T indéfinie ou limitée, car elle peut être l'une ou l'autre, ne reçoit de lumière ni de A, ni de B, puisqu'elle est commune aux deux cônes d'ombre; mais l'espace S forme pénombre, car s'il appartient au cône d'ombre de B, il est en dehors du cône d'ombre de A, et est par conséquent éclairé par ce point A. De même l'espace S' est aussi pénombre, car il est dans le cône d'ombre de A, mais il est éclairé par B.

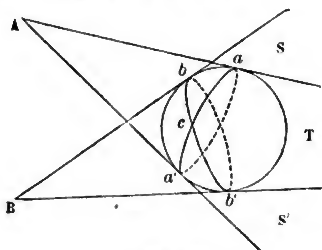


Fig. 176.

Chambre obscure. — La propagation rectiligne de la lumière nous donne encore l'explication d'un fait curieux et d'une observation facile. Supposons l'observateur dans une chambre dont tous les volets sont hermétiquement fermés de manière à ne laisser pénétrer aucune lumière. Un trou étant percé dans l'un de ces volets, si l'observateur vient à présenter à une petite distance de ce trou une

feuille de papier tendue sur un cadre et formant écran, il voit alors sur cette feuille une représentation fidèle de tout ce qui est au dehors; les objets viennent s'y peindre avec leurs formes, leurs couleurs, leurs positions relatives; seulement ces images sont renversées. Ainsi le ciel paraît en bas, le sol en haut; les objets qui sont à droite dans le paysage paraissent à gauche sur l'écran.

Un seul point lumineux A (fig. 177), envoyant par l'ouverture *o* un faisceau conique de rayons, donnera sur l'écran en A' une image de l'ouverture; le point B placé *au-dessus* de A donnera en B', *au-dessous* de A', une autre image de cette ouverture. Des points lumineux disposés sur une circonférence donneront des images de l'ouver-

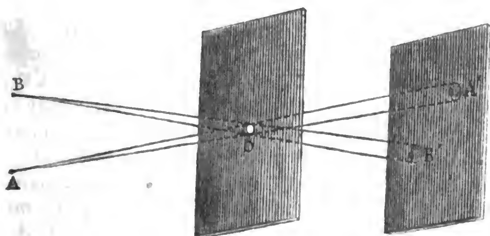


Fig. 177.

ture disposées également sur une circonférence. Un disque lumineux donnera une image circulaire formée par un assemblage d'images de l'ouverture, quelle que soit d'ailleurs la forme de cette ouverture. En un mot, tous les objets placés au dehors de la chambre, qu'ils soient lumineux par eux-mêmes ou éclairés par une lumière étrangère, donneront sur l'écran leur image, renversée de position par rapport à eux, et formée par la juxtaposition d'images de l'ouverture.

Vitesse de la lumière. — La vitesse de propagation de la lumière a été déterminée par Rœmer à l'aide de méthodes astronomiques; il a trouvé que la lumière du soleil mettait 8′ 13″ à parcourir la distance moyenne de cet astre à la terre, distance qui est d'environ 34 millions

de lieues : c'est donc, à peu de chose près, 70 000 lieues par seconde.

Si lorsque la terre se trouve en ligne droite avec le soleil et Jupiter, et en conjonction avec cette planète, on observe le temps qui s'écoule entre deux éclipses successives du premier satellite de Jupiter, on sera en mesure de calculer le nombre d'éclipses qui devront avoir lieu jusqu'au moment où la terre se retrouvera en ligne droite avec le soleil et Jupiter, mais en opposition avec la planète, et même le moment précis de la dernière éclipse. Or le moment où l'on observe cette éclipse est en retard de 16′,26″ sur l'instant marqué par le calcul. Ce retard est dû au temps que la lumière met à parcourir le diamètre de l'écliptique, qui fait la différence des deux distances que la lumière a à franchir pour venir du satellite à la terre dans ces deux positions extrêmes de notre globe.

Comparaison des intensités lumineuses. — La quantité de lumière versée par une source lumineuse sur une étendue donnée de surface varie avec la distance, et suivant la même loi que nous avons déjà trouvée pour la chaleur : elle est, pour une petite surface plane perpendiculaire à la direction des rayons, en raison inverse du carré de la distance.

On peut le démontrer approximativement de la manière suivante. A l'une des extrémités d'une longue table on dresse verticalement un cadre de papier huilé, comme ceux dont on se sert pour les ombres chinoises et on le partage en deux par une cloison perpendiculaire en carton ou en bois, noircie sur ses deux faces. On prend cinq chandelles donnant autant que possible la même lumière, et on s'en assure en les comparant deux à deux, allumées et placées l'une d'un côté, l'autre de l'autre côté de la cloison, à égale distance du cadre, et s'assurant qu'elles éclairent également les deux moitiés du papier. Laissant alors l'une de ces chandelles à 30 centimètres du cadre par exemple, on réunit de l'autre côté de la cloison les quatre autres chandelles en un faisceau serré de manière qu'elles forment une source d'intensité quatre fois aussi grande, et l'on éloigne ce faisceau du cadre jusqu'à ce que les deux moitiés du papier soient également éclairées, En mesurant alors la distance on la trouve égale à $2 \times 0^{m},30$ ou $0^{m}60$. Si le faisceau était de 9 bougies il faudrait le reculer à $0^{m},90$ pour avoir le même éclairement. Ainsi la même source lumineuse qui, à même distance que la chandelle prise pour unité, donnerait quatre fois ou neuf

fois autant de lumière, à une distance double ou triple ne donne plus qu'une quantité de lumière égale. La loi se trouve donc démontrée.

Réciproquement, si, comparant à la chandelle une source de lumière dont l'intensité lumineuse relative est inconnue, on trouve qu'il faut la mettre à $0^m,90$ du papier pour qu'elle éclaire autant que la chandelle placée à $0^m,30$, c'est que son intensité lumineuse est neuf fois plus grande. Les intensités lumineuses des sources sont proportionnelles aux carrés de leurs distances au papier, lorsqu'elles sont placées de manière à l'éclairer également.

Réflexion de la lumière. — Lorsqu'un faisceau de rayons lumineux tombe sur une surface polie, il rebondit

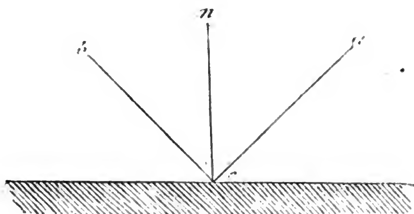


Fig. 178.

pour ainsi dire, sur cette surface, à peu près comme une balle élastique contre le sol. Ce changement brusque de direction s'appelle la *réflexion*. Le rayon réfléchi est rectiligne aussi bien que le rayon incident. Ils sont compris dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante, et font dans ce plan des angles égaux avec la perpendiculaire à cette même surface, ce que l'on exprime sous cette forme : l'angle d'incidence (*acn*) est égal à l'angle de réflexion (*bcn*) (fig. 178).

Cette loi, qui règle aussi la réflexion de la chaleur et celle du son, se démontre de la manière suivante :

Un cercle gradué ou *limbe* vertical, porte en son centre un petit miroir métallique plan, fixé horizontalement

(fig. 179). Deux tubes peuvent glisser sur le limbe, portés par des curseurs; les axes de ces tubes sont dirigés vers le centre du cercle. On donne à l'un des tubes une position quelconque, et l'on place une bougie sur le prolongement de son axe. On cherche alors à apercevoir au travers de l'autre tube la flamme de la bougie par réflexion sur le miroir. L'expérience montre qu'il y a toujours une position de ce second tube qui permet de voir la flamme. Or, comme le limbe est vertical et le miroir horizontal, cela prouve déjà que la réflexion s'opère dans un plan perpendiculaire à la surface réfléchissante. De plus, si l'on compte le nombre de degrés compris sur l'arc gradué entre chacune des lunettes et l'extrémité supérieure du diamètre vertical, on trouve que ces deux arcs sont égaux. Or, ils mesurent précisément les angles d'incidence et de réflexion : donc ces angles sont égaux.

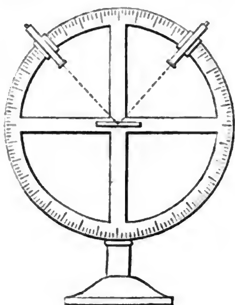


Fig. 179.

Miroirs plans. — Il va nous être facile maintenant de rendre compte de la formation des images par réflexion.

Soit MF une surface horizontale polie, et AI un rayon incident compris dans un plan vertical quelconque qui sera ici le plan du tableau (fig. 180). Pour trouver la direction du rayon réfléchi, nous abaisserons du point A sur MN une perpendiculaire AD que nous prolongerons d'une longueur DA′=DA. Si nous joignons le point A′ au point I, le prolongement IB de cette droite A′I sera le

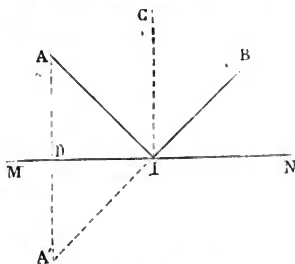


Fig. 180.

rayon réfléchi. En effet, il est avec AI dans le plan vertical perpendiculaire à la surface réfléchissante. De plus, les angles aigus A et A′ sont égaux, ID étant perpendiculaire au milieu de AA′; si nous menons CI perpendiculaire à MN et par conséquent parallèle à AA′, on a CIA=A comme alternes internes, et CIB=A′ comme correspondants, il en résulte CIA=CIB. Ainsi la droite IB satisfait aux deux lois de la réflexion; elle donne donc la direction du rayon réfléchi.

Plaçons maintenant un objet AB devant un miroir, l'œil étant dans la position O (fig. 181). Si du point A′, déter-

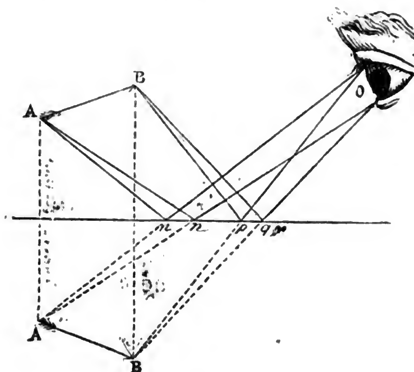


Fig. 181.

miné comme nous l'avons dit tout à l'heure, on mène des droites formant un cône qui aurait pour base l'étendue de la pupille, ce cône interceptera sur le miroir une petite portion de surface *mn*; alors tous les rayons partis du point A, et compris dans le cône A*mn*, seront réfléchis dans la portion *mn*O et arriveront à l'œil comme s'ils partaient du point A′. Ce point A′ est pour l'œil comme un centre de rayonnement lumineux, c'est là que l'œil voit le point A. C'est l'*image* du point A. De même les rayons partis du point B arriveront à l'œil comme s'ils lui venaient du point B′, c'est dire que l'œil verra le point B

dans la position B'. Ainsi l'objet AB sera vu, *quelle que soit d'ailleurs la position de l'œil*, en A'B', derrière le miroir et dans une position symétrique de AB. A'B', s'appelle l'*image* de AB.

Si l'on dispose en face l'un de l'autre deux miroirs parallèles (fig. 182), un objet *m*, placé entre les deux, don-

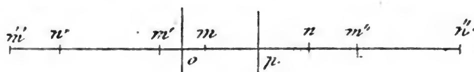


Fig. 182.

nera d'abord, par la réflexion sur AB, une image en m'; puis les rayons réfléchis par AB seront envoyés à CD comme s'ils venaient de m', et formeront une autre image m''; renvoyés sur AB ils formeront une troisième image et ainsi de suite. En même temps d'autres rayons partis de ce même point *m* tomberont d'abord sur CD et formeront une première image n', puis renvoyés sur AB ils donneront en n'' une image de n', etc. On verra ainsi une double série d'images de plus en plus éloignées. Si par exemple *m* est un lustre allumé, on croira voir une galerie d'une immense profondeur splendidement illuminée.

Quand les miroirs, au lieu d'être parallèles, font entre eux un certain angle, les images se disposent alors en cercle autour du sommet de l'angle, et forment ces figures remarquables par leur symétrie que nous fournit le *Kaléidoscope*.

Ce petit instrument, si connu des enfants, si précieux aux peintres de vitraux par les combinaisons pour ainsi dire indéfinies de formes et de couleurs qu'il leur fournit, se compose d'un tube cylindrique contenant deux miroirs inclinés à 60°; à l'une des extrémités du tube est une boîte fermée par une plaque de verre dépoli et qui renferme de petits fragments de verre coloré, des morceaux de clinquant, de chenille, etc.; à l'autre extrémité du tube est une petite ouverture où l'on place l'œil.

Les miroirs en glace étamée ont un inconvénient que ne présentent pas les miroirs métalliques; comme ils ont en

réalité deux surfaces réfléchissantes, la surface antérieure du verre, et la surface postérieure étamée, ils donnent deux images, l'une symétrique par rapport à la première surface et assez pâle ; l'autre symétrique par rapport à la seconde surface, et beaucoup plus brillante. Elles sont d'autant plus distinctes que l'on regarde le miroir plus obliquement et que le verre est plus épais.

Miroirs courbes. — La réflexion sur les surfaces courbes donne naissance à des images dont la position et la grandeur varient avec la distance de l'objet à la surface réfléchissante. Nous allons exposer succinctement les faits fournis par l'expérience, et seulement dans le cas de miroirs sphériques.

Un miroir sphérique est une portion de surface de sphère, une calotte sphérique ; son rayon est le rayon de la sphère ; la ligne droite qui va du point milieu, ou, pour parler en langage géométrique, du pôle du miroir au centre de la sphère, s'appelle l'*axe principal*. La surface du miroir ne doit être qu'une fraction assez petite de la surface entière de la sphère.

Quant la réflexion s'opère sur la partie creuse de la calotte, on donne au miroir le nom de *miroir concave*. Si la réflexion a lieu sur l'autre face, le miroir est dit *miroir convexe*.

Miroirs concaves. — Foyers. — Nous allons d'abord supposer un point lumineux situé sur l'axe principal, à une distance assez grande du miroir pour que les rayons qui tombent sur la surface puissent être considérés comme parallèles entre eux et parallèles à la direction de l'axe principal qui doit compter comme un de ces rayons. Nous nous rappellerons de plus que la surface du miroir ne doit être qu'une très-petite fraction de la surface entière de la sphère ; et s'il n'en était pas ainsi, nous ne considérerions qu'un faisceau de rayons s'écartant très-peu du point A. SI étant un des rayons du faisceau, AI doit être un arc d'un très-petit nombre de degrés (fig. 183).

Voici ce qui résulte de cette convention dont on s'écarte le moins possible dans la pratique :

Si de différents points O, O′ O″ O‴, pris sur une même droite,

on mène des circonférences tangentes en un même point A de la droite, ces circonférences peuvent être considérées comme ayant un certain élément commun ; et dès lors ce très-petit arc peut être regardé comme ayant pour centre indifféremment le

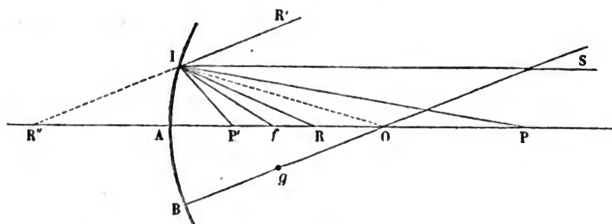


Fig. 183.

point O, le point O', le point O", ou tout autre point de la droite, soit d'un côté soit de l'autre du point A. C'est précisément dans ces conditions que nous place notre hypothèse par rapport à l'arc AI.

Ceci posé, voyons quelle est la marche du rayon réfléchi. Le rayon qui tombe en I forme avec le rayon de la sphère, qui est la perpendiculaire au plan tangent, et par conséquent à l'élément même de la surface, un certain angle SIO. Pour avoir la direction du rayon réfléchi, il suffit de tracer dans le plan de la réflexion qui est ici SIO, ou le plan du tableau, une droite If qui fasse avec IO l'angle fIO $=$ SIO. Or, remarquons que AOI $=$ SIO comme alternes internes, que fIO $=$ SIO par construction. D'où fIO $=$AOI. D'où résulte fO$=$FI. Mais notre hypothèse sur la petitesse de l'arc AI nous permet de prendre Af pour If, donc le point f est le milieu du rayon. Ainsi, quel que soit le rayon SI, pourvu qu'il remplisse cette condition que l'arc AI soit très-petit, son rayon réfléchi passera par le milieu f du rayon AO.

Donc tous les rayons parallèles à l'axe qui tombent sur un miroir de très-petite surface par rapport à la sphère dont il fait partie, ou qui, sur un miroir quelconque, n'interceptent qu'un arc total d'un très-petit nombre de degrés, vont tous se croiser par la réflexion en un même point f de l'axe principal. Ce point, qui est le milieu du rayon AO, s'appelle le *foyer principal* du miroir.

Prenons maintenant un point lumineux P, au delà du centre,

mais à une distance quelconque du miroir. Le rayon PI (nous supposons toujours l'arc AI très-petit), faisant avec la perpendiculaire OI, un angle PIO, moindre que celui que forme le rayon parallèle à l'axe, son angle de réflexion OIR sera moindre que OI*f*, et le point de rencontre avec l'axe aura lieu entre *f* et O. Il est facile de voir en outre que tous les rayons partis du point P, et qui tombent sur le miroir, très-près du point A, vont tous couper l'axe en un même point. En effet IO étant la bissectrice de l'angle ROP, une propriété géométrique bien connue nous donne :

$$\frac{RO}{OP}=\frac{RI}{IP};$$

et comme on peut, à cause de la petitesse de l'arc AI, remplacer RI par RA et PI par PA :

$$\frac{RO}{OP}=\frac{RA}{AP};$$

d'où

$$\frac{RO}{RA}=\frac{OP}{AP};$$

Or, la position du point P étant donnée, OP et AP sont des longueurs qui resteront les mêmes quel que soit I ; donc le rapport de RO à RA est fixe. La position du point R étant indépendante de celle du point I, notre proposition se trouve établie.

Ainsi tous les rayons partis du point P sont par la réflexion renvoyés dans des directions qui se croisent toutes au point R. L'œil recevant ces rayons réfléchis, comme s'ils lui venaient du point R, ce point R est pour lui un centre de rayonnement lumineux. R s'appelle le foyer du point P.

Si le point P se rapproche de plus en plus du centre, l'angle PIO diminuant, l'angle RIO qui lui est égal diminue aussi ; de sorte que le point R se rapproche également du centre. Si le point lumineux passe entre O et *f*, par exemple dans la position R, il est évident alors que le rayon RI se réfléchit suivant IP, et que le point P est le foyer du point R. Ces deux points P et R sont donc tels que si l'un d'eux est le point lumineux, l'autre est son foyer ; on les appelle à cause de cela *foyers conjugués*. A mesure que le point R s'éloigne du centre et marche vers *f*, le point P s'éloigne aussi du centre en sens contraire ; quand le point lumineux arrive en *f*, les rayons tels que *f*I

sont rendus par la réflexion parallèles à l'axe et ne forment plus de foyer puisqu'ils ne se croisent plus.

Supposons enfin le point lumineux entre le foyer principal *f* et le miroir, par exemple en P'; l'angle P'IO étant plus grand que *f*IO, l'angle de réflexion OIR' doit être plus grand que OIS; par conséquent le rayon réfléchi passe au-dessus du rayon parallèle IS, et ne peut rencontrer l'axe. Cependant si on prolonge l'axe et le rayon réfléchi derrière le miroir, ils se rencontrent en R''. D'ailleurs tous les rayons partis du point P' auront leur point de croisement avec le prolongement de l'axe en ce même point R'', pourvu qu'on les suppose toujours formant un faisceau d'une très-petite ouverture et n'interceptant qu'un très-petit arc.

En effet, IO est la bissectrice de l'angle P'IR', supplémentaire de l'angle P'IR'', on a donc toujours d'après le même théorème:

$$\frac{\mathrm{PO'}}{\mathrm{OR''}}=\frac{\mathrm{P'I}}{\mathrm{R''I}}=\frac{\mathrm{P'A}}{\mathrm{R''A}};$$

d'où

$$\frac{\mathrm{R''A}}{\mathrm{OR''}}=\frac{\mathrm{P'A}}{\mathrm{OP'}},$$

Dès lors la position du point I devient indifférente, et la position de R'' reste la même, pourvu que P' ne change pas.

Ainsi tous les rayons réfléchis arrivent dans ce cas à l'œil, comme s'ils partaient du point R'', quoiqu'ils ne passent même pas par ce point. R'' s'appelle le foyer *virtuel* du point P''.

Réciproquement, si l'on suppose un faisceau de rayons qui tomberaient tous sur le miroir en convergeant vers le point R'', la réflexion les amèneraient à se croiser au point P. C'est le seul cas où un point placé entre le centre et le foyer principal puisse être un foyer, et alors c'est un foyer réel.

Tous les diamètres d'une sphère sont identiques, tous sont dans les mêmes conditions par rapport à la surface. Dès lors toute droite passant par le centre du miroir, et par un point quelconque de la surface doit jouir, et jouit en effet des mêmes propriétés optiques que l'axe principal.

Ainsi 1° un point lumineux situé sur l'axe secondaire OB à une distance excessivement grande, aura son foyer en *g* milieu de OB; 2° un point lumineux placé sur cet axe secondaire au delà du centre, mais à une distance finie, aura son foyer conjugué entre *g* et O, et d'autant plus près de O qu'il en sera plus

près lui-même; 3° que le point lumineux passe entre O et g, alors le foyer conjugué sera de l'autre côté du centre, à une distance d'autant plus grande que le point lumineux sera plus près de g; 4° si le point lumineux est en g même, les rayons seront renvoyés par la réflexion parallèles à BO, et ne formeront plus de foyers; 5° si le point lumineux passe entre g et B, alors les rayons réfléchis seront divergents par rapport à l'axe secondaire, et formeront un foyer virtuel derrière le miroir.

Ces principes importants sur la formation des foyers une fois bien compris, il devient facile de rendre compte des différents cas qui peuvent se présenter dans la formation des images des objets.

Miroirs concaves. — Images. — Voici les différents cas qui peuvent se présenter pour les miroirs concaves :

1° Si l'on tourne l'axe du miroir vers le soleil ou une étoile, c'est-à-dire vers un objet placé à une distance extrêmement grande, les rayons partis d'un même point de l'objet (fig. 184), réfléchis par le miroir, convergent vers

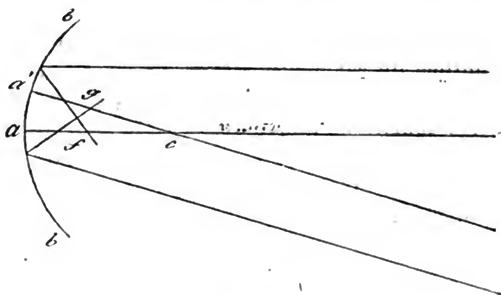


Fig. 184.

un même point qui est le point f milieu du rayon du miroir, ac, si l'on considère le point lumineux situé sur l'axe ; ou le point g milieu de $a'c$, si le point lumineux est sur cette droite $a'c$. Pour l'œil, ces points fg.... sont de véritables centres de rayonnement lumineux; c'est là qu'il voit les points de l'objet. L'ensemble de ces points fg.... constitue l'image de l'objet. Cette image est renversée par

rapport à l'objet, et plus petite que lui. Elle est dite *image réelle*, parce que les rayons lumineux se croisent réellement aux points *fg*...., et que si l'on place une feuille de papier étroite en *f*, l'image deviendra visible sur cette feuille par le fait d'une *réflexion irrégulière* ou *diffusion* qui s'opérera sur les divers points du papier, aux sommets de chacun des cônes réfléchis.

2° Si l'objet VT est placé au delà du centre du miroir (fig. 185), alors les rayons lumineux envoyés par le point V

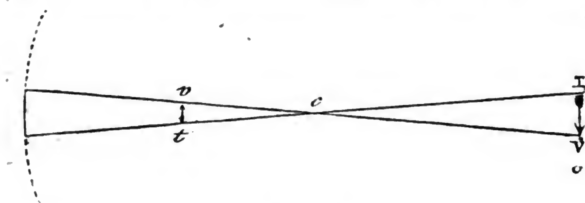


Fig. 185.

sur le miroir vont, après la réflexion, converger en un point *v* placé sur l'axe secondaire V*c*, entre le point *c* et le point milieu du rayon. De même les rayons partis du point T vont converger en *t*; l'ensemble de ces foyers particuliers constitue l'image de VT, image réelle, renversée par rapport à l'objet et plus petite que lui. Au fur et à mesure que l'objet se rapproche du centre *c*, son image s'en rapproche également par un mouvement inverse.

Le rapport de grandeur des images est facile à établir. Les triangles VCT et *vct* sont semblables et donnent la relation :

$$\frac{vt}{\mathrm{VT}} = \frac{vc}{\mathrm{VC}}.$$

Or le rapport $\frac{vc}{\mathrm{VC}}$ est le même que le rapport $\frac{\mathrm{RO}}{\mathrm{OP}}$ de la figure 183. Nous avons établi alors l'égalité $\frac{\mathrm{RO}}{\mathrm{OP}} = \frac{\mathrm{RA}}{\mathrm{AP}}$. Comme RA est nécessairement plus petit que AP, on a $\frac{vt}{\mathrm{VT}} < 1$ ou $vt < \mathrm{VT}$.

3° Si l'objet prend la position *vt* entre le centre *c* et le foyer, alors les rayons prennent la même route en sens contraire et vont former en VT, au delà du centre, l'image de *vt*, image réelle, renversée par rapport à l'objet, et plus grande que lui.

Si l'objet était au foyer même, alors les rayons émis par chaque point seraient renvoyés par la réflexion parallèles à l'axe qui passe par ce point ; il n'y aurait donc plus de foyer, partant plus d'image.

4° Enfin si l'objet est placé entre le foyer principal et le miroir (fig. 186), les rayons émis par le point V sont renvoyés par la réflexion dans des directions divergentes par rapport à VC ; mais si on prolonge leur direction derrière le miroir, alors ils rencontrent cette ligne en *v*. Nous

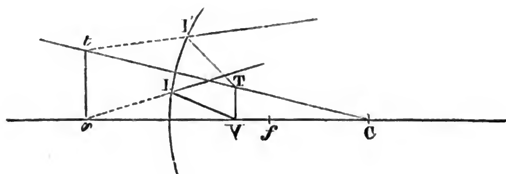


Fig. 186.

avons ici une image du point V analogue à celles que donnent les miroirs plans : on lui donne le nom d'image *virtuelle*, parce que les rayons lumineux ne se croisent pas réellement en *v*. Toutefois, l'œil reçoit, après la réflexion, ces rayons comme s'ils lui venaient de ce point *v*, qui se trouve alors être pour l'œil un centre fictif de rayonnement ; il en sera de même des rayons partis du point T. Ils formeront un point de croisement virtuel en *t* ; l'image *vt* de l'objet VT sera donc une image virtuelle droite par rapport à l'objet et plus grande que lui.

Pour constater par l'expérience ces divers rapports de position et de grandeur de l'image, on n'aura qu'à disposer, dans une chambre bien fermée à la lumière, un miroir concave à l'une des extrémités d'une longue table, et à mettre une bougie allumée sur cette table à diverses

distances du miroir. On pourra observer les images en plaçant l'œil sur la direction des rayons réfléchis et au delà de l'image, ou bien en recevant cette image sur un petit écran de papier. Seulement cette dernière méthode ne permettra pas de saisir l'image virtuelle.

Miroirs convexes (fig. 187).—Quant aux miroirs convexes ils donnent toujours des rayons divergents après la

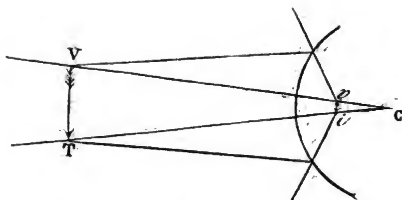


Fig. 187.

réflexion, que le point lumineux soit sur l'axe, ou qu'il soit sur un diamètre quelconque. Ces faisceaux divergents donnent toujours lieu à des images virtuelles, plus petites que les objets, et droites.

Remarquons que dans les deux espèces de miroirs sphériques les images virtuelles sont toujours droites, et les images réelles toujours renversées par rapport aux objets ; en second lieu que les images réelles se forment en avant du miroir, et les images virtuelles par derrière.

On peut démontrer pour les miroirs convexes comme pour les miroirs concaves, que les rayons divergents partis d'un même point lumineux situé sur l'axe principal et qui rencontrent le miroir à une très-petite distance, vont croiser par leurs prolongements l'axe principal en un même point, et la démonstration est la même que celle que nous avons déjà donnée pour les miroirs concaves.

Soit P le point lumineux (fig. 188) : PI un rayon ; AI un arc assez petit pour qu'on puisse le considérer comme décrit indifféremment du point P, du point P', ou de tout autre point de l'axe comme centre. Le rayon réfléchi IR compris dans le

plan du tableau, fera avec le rayon CIN, qui est la perpendiculaire au plan tangent, l'angle NIR = NIT. Soit P' le point de

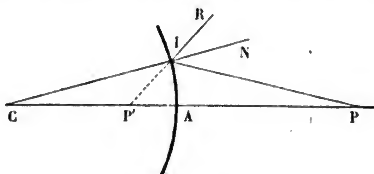


Fig. 188.

rencontre de son prolongement avec la partie de l'axe située derrière le miroir. IN étant la bissectrice de l'angle PIR, extérieur au triangle PIP', on a :

$$\frac{CP'}{CP} = \frac{P'I}{PI} = \frac{P'A}{PA}$$

d'où

$$\frac{CP'}{P'A} = \frac{CP}{PA}$$

P étant donné de position, le rapport $\frac{CP}{PA}$ conserve une valeur invariable indépendante de la position particulière du point I; donc quel que soit I, P' partage le rayon en deux parties ayant un rapport fixe. Donc tous les rayons partis du point P coupent l'axe au même point P'.

On démontrerait aussi facilement que, si PI était parallèle à l'axe, P' serait au milieu du rayon CA.

Le principe s'établirait de même pour un faisceau parti d'un point situé sur un axe secondaire quelconque.

Ainsi les foyers sont toujours virtuels. Les images le sont donc aussi. Dans la figure 187 le point V de l'objet donne un foyer virtuel en *v* ; le point T en donne un au point *t*. L'image virtuelle *vt* est évidemment droite , et plus petite que l'objet.

Détermination des foyers. — Pour trouver la position du foyer d'un miroir concave on tourne son axe vers le soleil et l'on cherche avec un petit écran la position pour laquelle l'image du soleil est le plus étroite et brillante. C'est évidemment le lieu des sommets des cônes

réfléchis et par conséquent le foyer principal, car l'éloignement du soleil est tel que l'on peut regarder les rayons qui viennent d'un même point de son disque comme parallèles entre eux. La position du foyer fait connaître celle du centre.

On ne peut employer ce moyen pour les miroirs convexes puisqu'ils ne donnent que des images virtuelles qu'on ne peut recevoir sur un écran, et que de plus cette image se forme derrière le miroir. On est obligé alors de déterminer, à l'aide d'un instrument appelé le sphéromètre, le rayon du miroir. Le point milieu du rayon donne la position du foyer.

Les miroirs sphériques servent à la construction des télescopes. On emploie le miroir concave aux usages de la toilette; en plaçant le visage à une distance moindre que la distance focale principale on voit son image droite et très-grossie.

Réfraction de la lumière. — Lorsqu'un rayon de lumière passe d'un milieu dans un autre milieu, les deux directions rectilignes de sa propagation dans ces deux milieux, font entre elles un certain angle. C'est ce que l'on exprime en disant que le rayon est *réfracté*[1].

Les deux rayons, incident et réfracté, sont dans un même plan perpendiculaire à la surface de séparation des milieux. De plus, le rayon se rapproche de la perpendiculaire à cette surface au point d'incidence, quand il passe dans un milieu plus dense, il s'en éloigne quand il passe dans un milieu moins dense. Si le rayon tombe

1. Nous ne nous occuperons que de la réfraction dans les milieux liquides ou dans les solides non cristallisés ; les substances cristallisées, au moins celles dont les formes ne se rattachent pas au cube, présentent en effet un phénomène exceptionnel : elles donnent pour un seul rayon incident deux rayons réfractés. On peut s'en convaincre en regardant au travers d'un cristal de *spath d'Islande* (carbonate de chaux rhomboédrique) une raie noire tracée à l'encre sur du papier; on verra deux images au lieu d'une seule que donnerait une plaque de verre. C'est ce que l'on appelle la *double réfraction*. Les substances qui présentent ce caractère sont dites substances *biréfringentes*.

perpendiculairement à la surface de séparation, alors seulement il poursuit sa route sans déviation.

Tout le monde sait qu'un bâton plongé en partie dans l'eau ne paraît plus rectiligne, et que la partie immergée semble se relever et faire un angle obtus avec la partie

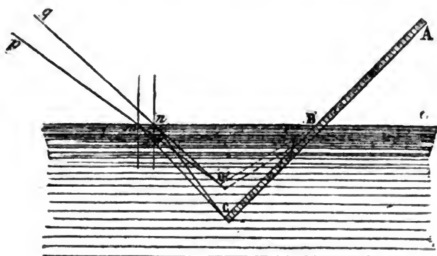


Fig. 189.

restée en dehors (fig. 189). La réfraction est la cause de cette apparence.

Les rayons C*m*, C*n*, qui partent du point C, en arrivant à la surface du liquide, s'écartent de la perpendiculaire puisqu'ils passent de l'eau dans l'air, ils prennent des directions telles que *mp*, *nq*. Pour l'œil placé sur le passage des rayons émergents, le point de départ de ces rayons est C', point où se rencontrent les directions prolongées de ces rayons; c'est donc en C' que l'œil verra le point C. Il en sera de même des points placés entre C et B; l'œil les verra relevés et la partie plongée paraîtra avoir la position C'B.

Si l'on place une pièce de monnaie sur le fond d'une terrine vide, et si on met ensuite l'œil au-dessous de la droite qui, partant du bord extrême du disque, rase le bord du vase, on n'apercevra pas du tout la pièce; mais si l'on fait verser de l'eau dans la terrine, on verra petit à petit apparaître l'objet et le fond du vase dont la profondeur semblera diminuée. L'explication est la même que pour le phénomène précédent; la figure 189 fait comprendre la marche des rayons qui arrivent à l'œil.

C'est encore par suite des réfractions qu'éprouvent les rayons lumineux en traversant les couches de plus en plus denses de notre atmosphère, que les astres nous paraissent plus élevés au-dessus de notre horizon qu'ils ne le sont réellement, et que nous les voyons un certain temps avant qu'ils soient réellement au-dessus de ce plan, et aussi quelque temps après qu'ils sont descendus au-dessous.

Soit en effet AB la surface convexe de la terre, MN le plan de l'horizon visible (fig. 190). Un astre placé en S enverra des

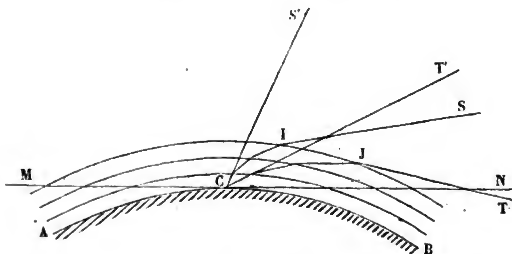


Fig. 190.

rayons, qui comme le rayon SI, traversant des couches de plus en plus denses devront, à chaque passage d'une couche dans la couche sous-jacente, se rapprocher de plus en plus de la perpendiculaire au point d'incidence, autrement dite la *normale*. Ils formeront ainsi une courbe IC tournant sa concavité vers le plan MN ; de sorte que l'œil verra le point S sur la direction du rayon au moment de son arrivée, c'est-à-dire sur la tangente CS', par conséquent plus haut, au-dessus de l'horizon, qu'il ne l'est réellement. Et pour la même raison, l'astre placé en T au-dessous de l'horizon nous apparaîtra en T' au-dessus de ce plan, pourvu qu'il ne soit pas trop au-dessous.

Loi de la réfraction. — La loi exacte de la réfraction ne nous est connue que depuis Descartes, qui l'a formulée ainsi : Pour deux mêmes milieux, le rapport du sinus de l'angle d'incidence, au sinus de l'angle de la réfraction, est constant. Voici comment on démontre cette loi par l'expérience. Le même appareil qui nous a servi pour la loi de la réflexion, va nous servir

encore, dans ce cas, avec une seule modification. Nous substituerons (fig. 191) au miroir plan horizontal un vase hémicylindrique en verre plein d'un liquide transparent. Nous plaçons alors l'un des deux tubes dans une position quelconque au-dessus du vase, et nous mettons une lumière sur la direction de l'axe de ce tube. Le faisceau de rayons qui traverse le tube tombe sur la surface horizontale de l'eau, se réfracte, arrive à la paroi du vase, suivant une direction évidemment perpendiculaire à cause de la forme de ce vase, et traverse alors sans se dévier de nouveau, il n'y a ainsi de déviation qu'à la première incidence. On place alors le second tube dans la partie inférieure du limbe, et l'on cherche la position qui permet d'apercevoir la lumière. Cette position peut toujours être trouvée ; ce qui prouve déjà, la surface du liquide étant horizontale et le plan du limbe vertical, que la réfraction s'opère dans un plan perpendiculaire à la surface de séparation des milieux. Au moyen d'un curseur horizontal glissant le long du diamètre vertical, on mesure les longueurs des deux perpendiculaires RC, SD, qui seront précisément les sinus des angles RIC, SID, et l'on trouve que, quelle que soit la position de la première lunette, ce rapport se conserve le même si le vase reste toujours plein du même liquide ; en changeant la nature du liquide, ou bien en employant un demi-cylindre de verre massif, on fera changer la valeur du rapport.

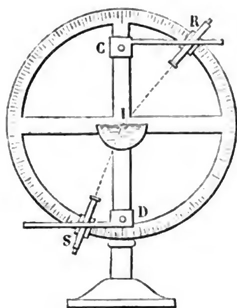


Fig. 191.

Si l'expérience était faite dans le vide le rapport serait ce que l'on appelle l'*indice* absolu de réfraction de la substance mise dans le vase ; l'expérience se faisant dans l'air, on n'a que l'indice relatif de la substance par rapport à l'air.

Un fait très-important à constater encore avec cet appareil, c'est que si, après avoir donné au tube supérieur et au tube inférieur des positions telles, que la lumière, étant mise sur l'axe du premier tube, l'œil l'aperçoive en se plaçant sur la direction du second, on vient ensuite à mettre cette lumière sur la direction du tube inférieur, l'œil l'apercevra en se plaçant dans la direction du tube supérieur ; ce qui prouve que la lumière suit la même route en sens inverse.

L'indice relatif de l'eau par rapport à l'air est environ 1,336 ou $\frac{4}{3}$. Ainsi le sinus de l'angle de réfraction dans l'eau ne doit jamais être que les $\frac{3}{4}$ du sinus de l'angle d'incidence.

L'indice relatif du verre par rapport à l'air est 1,52 environ $\frac{3}{2}$. Ainsi le sinus de la réfraction dans le verre est les $\frac{2}{3}$ du sinus de l'angle d'incidence.

Il suit de là que l'angle d'incidence croissant dans l'air depuis 0° jusqu'à 90°, l'angle de réfraction, dans l'eau, croîtra depuis zéro jusqu'à une valeur telle que le sinus de l'angle de réfraction soit égal à $\frac{3}{4}$, le sinus de 90° étant égal à 1. Dans le verre l'angle de réfraction croîtra jusqu'à ce que son sinus soit égal à $\frac{2}{3}$. Le paragraphe suivant va nous donner une conséquence importante de cette limitation de la grandeur de l'angle de réfraction.

Réflexion totale; angle limite. — Toutes les fois qu'un rayon de lumière se présente à la surface de séparation de deux milieux pour passer du moins dense dans le plus dense, comme il doit se rapprocher de la perpendiculaire, il y aura toujours, quelle que soit sa direction d'incidence, une direction de réfraction qui satisfait à cette condition ; ainsi il pourra toujours entrer. S'il arrive suivant la direction perpendiculaire AI (fig. 192), il conti-

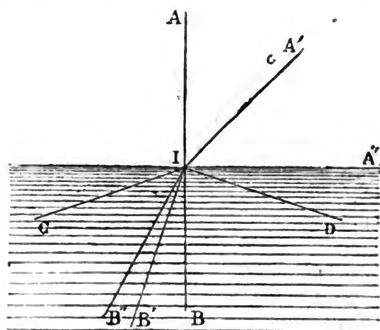


Fig. 192.

nuera sa route suivant IB sans déviation. S'il arrive suivant A'I, il prendra une direction IB' telle que B'IB < A'IA ;

et si, à la limite, il arrive en rasant la surface suivant A″I, il se réfractera suivant B″I; réciproquement, s'il se présente à la surface venant du milieu le plus dense pour passer dans le moins dense, il suivra la même marche en sens inverse; s'il arrive suivant BI, il sortira sans déviation suivant IA. S'il a la direction B′I, il prendra en sortant la route IA′. Enfin s'il arrive en suivant la ligne limite B″I, il émergera en rasant la surface IA″; en un mot, sa direction d'émergence sera comprise entre AI et A″I. Mais s'il se présentait suivant une direction CI, en dehors de l'angle BIB″, alors il n'y aurait plus de direction d'émergence correspondante, et le rayon se trouverait renvoyé par la réflexion régulière dans le milieu inférieur, suivant la direction ID. On donne à ce phénomène le nom de *réflexion totale*, et à l'angle BIB″, celui d'*angle limite*. Pour l'eau, l'angle limite est de 48°,35; pour le verre il est de 41°,48, la lumière se présentant pour passer dans l'air.

Cet angle limite est celui dont le sinus est égal à la valeur inverse de l'indice de réfraction. Ainsi le sinus de l'angle 48°,35 est égal à $\frac{3}{4}$, et celui de l'angle 41°,48 est égal à $\frac{2}{3}$. D'une manière générale, m étant l'indice de réfraction, l'angle limite B″IB aura pour sinus $\frac{1}{m}$.

C'est à ce phénomène de la réflexion totale qu'il faut attribuer l'éclat argenté que présentent les bulles d'air engagées dans la masse du verre. Leur surface devient, par le fait de la réflexion totale, un véritable miroir.

Si l'on remplit d'eau à moitié une carafe, et si l'on place l'œil au-dessous du niveau de l'eau, en dirigeant son regard vers la surface du liquide, vue ainsi en dessous, on aperçoit, par la réflexion totale, les objets qui sont de l'autre côté de la carafe, et, comme l'œil, plus bas que le niveau du liquide.

Lorsqu'un rayon de lumière traverse une lame dont les deux faces sont parallèles (fig. 193), il ressort suivant une direction parallèle à sa direction d'incidence. Ce qui

doit être, puisque les angles intérieurs r et r' étant égaux, les angles extérieurs i et i' doivent l'être également.

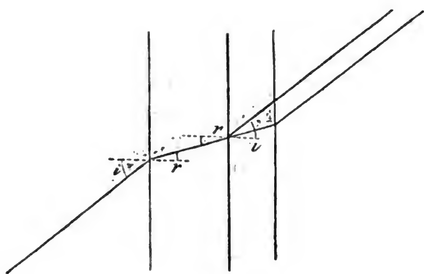


Fig. 193.

Mais la distance des deux directions parallèles sera évidemment d'autant plus grande que la lame sera plus épaisse.

Prismes. — Si le milieu réfringent est compris entre deux faces planes formant entre elles un certain angle, il constitue ce qu'on appelle en optique un *prisme.* Nous ne considérerons que le cas où la réfraction s'opère dans un plan perpendiculaire à l'arête d'intersection des deux faces, plan que l'on nomme la *section principale* du prisme.

Lorsqu'un faisceau de lumière traverse un prisme, il est dévié de sa direction, mais il présente de plus des phénomènes particuliers de coloration. De même, si l'on regarde un objet au travers d'un prisme, on le voit dans une position autre que sa position réelle, et de plus l'image que l'on aperçoit offre sur ses bords des *irisations* qui rappellent les couleurs de l'arc-en-ciel. Nous séparerons l'étude de ces deux phénomènes, en ne nous occupant, pour le moment, que de la déviation du rayon.

Prenons un rayon SI parti d'un point S (fig. 194), il devra, passant de l'air dans le verre, se rapprocher de la perpendiculaire I*n* et par conséquent s'abaisser au-dessous de sa direction première. Arrivé en I', il devra, pas-

sant du verre dans l'air, s'écarter de la perpendiculaire I'p', ce qui l'abaissera encore au-dessous de sa direction

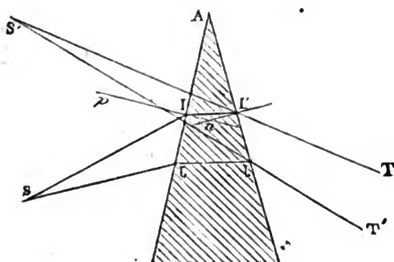


Fig. 194.

primitive SI. Il est bien entendu, d'ailleurs, que si l'angle d'incidence intérieure en I' dépassait la valeur de l'angle limite, le rayon n'émergerait pas, et serait renvoyé par réflexion totale dans le prisme.

Un second rayon SJ, parti du même point S, suivra une marche analogue SJJ'T'. Nous laissons à nos lecteurs à démontrer, par la comparaison facile des angles d'incidence et de réfraction en I, I', J et J', que le rayon J'T' reste à sa sortie divergent par rapport à I'S'. Le faisceau divergent arrivera à l'œil, placé sur sa direction de sortie, comme s'il venait du point S', point de rencontre des directions I'T, J'T', prolongées. Ainsi l'œil, par le fait de l'abaissement des rayons, verra le point S en S', plus haut qu'il n'est réellement. S' est une image *virtuelle* du point S.

Si l'arête du prisme était en bas, le point S' serait, au contraire, au-dessous de S.

Minimum de déviation. — Si l'on fait arriver par une ouverture étroite, pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, un faisceau horizontal de rayons parallèles et si on le reçoit sur un prisme également horizontal dont les arêtes seront perpendiculaires à la direction des rayons, on aura une image de l'ouverture dont on pourra comparer la position à celle que

formait le faisceau avant l'interposition du prisme. Le prisme ayant son sommet en haut, l'image sera abaissée ; s'il a son sommet en bas, l'image sera au contraire relevée. La distance de l'image déviée à l'image formée par le faisceau direct variera avec la position qu'on donnera au prisme en le faisant tourner autour d'une de ses arêtes. Elle augmentera ou diminuera suivant qu'on tournera dans un sens ou dans le sens opposé.

Mais si le prisme est placé de telle sorte que le rayon intérieur perce les deux faces du prisme en des points I', I également éloignés du point A de telle sorte que le triangle AII' soit isocèle, et que les angles SIp, TI'p' soient égaux, alors quel que soit le sens, quelle que soit la grandeur du déplacement angulaire donné au prisme, l'image déviée s'éloignera toujours de l'image directe. C'est donc par cette position du prisme que le faisceau éprouve la plus faible déviation, et que l'angle DCT des droites SI, TI', qui mesure cette déviation, est le plus petit. On dit que le prisme est à la position du *minimum de déviation.*

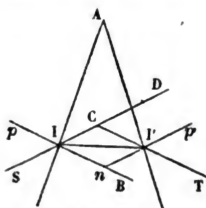


Fig. 195.

Cette position du prisme se prête particulièrement à la détermination des indices de réfraction relatifs des substances par rapport à l'air.

Supposons qu'on ait amené le prisme dans la position du minimum de déviation; on a alors :

$$pIS = p'I'T = CIn = CI'n.$$

on a aussi :

$$nII' = nI'I,$$

par suite

$$CII' = CI'I.$$

L'angle de déviation minimum DCT, égal à la somme des angles CII', CI'I, est donc égal à 2CII' ou 2 (SIp — nII') ;

Appelons, pour abréger, D l'angle de déviation minimum, i l'angle d'incidence SIp, et r l'angle de réfraction nII',

$$D = 2i - 2r.$$

D'autre part l'angle BnI' est égal à l'angle du prisme A comme ayant les côtés perpendiculaires.

Or

$$BnI' = nII' + nI'I = 2r.$$

Donc

$$A = 2r.$$

D'où

$$D = 2i - A \quad \text{ou} \quad 2i = D + A,$$

On a donc enfin

$$i = \frac{A + D}{2},$$

$$r = \frac{A}{2};$$

par suite l'indice de réfraction cherché a pour valeur

$$\frac{\sin \frac{1}{2}(A + D)}{\sin \frac{1}{2} A}.$$

Les angles A et D sont donnés par une mesure directe, et leurs sinus par des tables spéciales.

Lentilles. — On appelle *lentille* un milieu réfringent compris entre deux portions de surfaces sphériques ; on en emploie de plusieurs espèces (fig. 196).

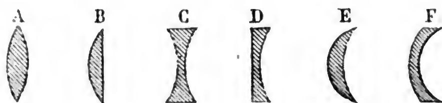


Fig. 196.

1° Les lentilles *convexes*, comprises entre deux surfaces de sphère qui se coupent : A.

2° Les lentilles *plan-convexes*, formées par un plan et une surface de sphère qui se coupent : B.

3° Les lentilles *concaves*, comprises entre deux portions de surfaces de sphères qui ne se coupent pas : C.

4° Les lentilles *plan-concaves*, comprises entre un plan et une portion de surface de sphère qui ne se coupent pas : D.

5° Les *ménisques-convergents*, qui rentrent dans la première catégorie et qui diffèrent de la première espèce de lentilles par la position des centres, qui sont d'un même côté de la lentille : E.

6° Les *ménisques-divergents*, qui se rattachent de la même manière aux lentilles de la troisième catégorie : F.

Lentilles convexes. — La lumière, en traversant les lentilles biconvexes, donne des images qui rappellent, par leurs rapports de position et de grandeur avec les objets, ce que nous avons dit des miroirs concaves, avec cette différence que les images réelles sont derrière la lentille, et les images virtuelles en avant et du même côté que l'objet, tandis que dans les miroirs les images réelles sont du même côté que l'objet, en avant du miroir, et les images virtuelles par derrière.

Ainsi les rayons qui arrivent parallèlement entre eux (fig. 197) venant d'un point situé à une distance infinie

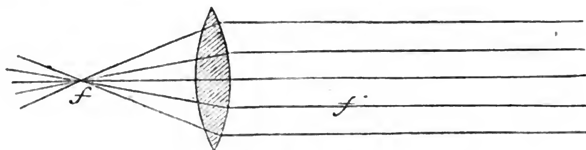


Fig. 197.

sur l'*axe principal* qui joint les deux centres des sphères, se trouvent par les deux réfractions successives, éprouvées sur les faces de la lentille, éloignés de la courbe d'intersection de ces deux faces, comme ils le seraient du sommet d'un prisme dont les faces planes seraient les plans tangents menés aux deux points, antérieur et postérieur, d'incidence; ils convergent donc vers l'axe principal, et se croisent en un même point *f* de cet axe appelé *foyer principal*, situé du côté de la lentille opposé à celui d'où viennent les rayons, et à une distance (distance focale) d'autant plus grande que les rayons de courbure des faces de la lentille sont plus grands eux-mêmes. L'œil placé sur le passage du faisceau après sa conver-

gence reçoit les rayons comme s'ils lui venaient directement du point de croisement.

Si le point lumineux se rapproche petit à petit de la lentille, les rayons, toujours convergents après les deux réfractions, mais moins fortement que dans le premier cas, vont croiser l'axe principal au delà du foyer, à une distance de plus en plus grande de la lentille, jusqu'à ce que le point lumineux arrive au point f', foyer principal formé par les rayons qui viendraient parallèlement à l'axe, mais de l'autre côté de la lentille. Dans ce cas-là, les rayons sortent de la lentille parallèles à l'axe et ne forment plus de foyer. Le point lumineux étant à une distance de la lentille double de la distance focale principale, le foyer conjugué est de l'autre côté de la lentille, à une distance exactement égale. Enfin si le point lumineux se place entre le foyer f' et la lentille, alors les rayons sortent de la lentille, divergents par rapport à l'axe, mais moins divergents toutefois qu'à leur arrivée sur la première surface, et ne le rencontrent plus que par leurs prolongements géométriques. La rencontre a lieu en arrière du point lumineux et produit un *foyer virtuel.*

Les mêmes rapports de position se retrouvent encore dans le cas où le point lumineux serait situé, non plus sur l'axe principal, mais sur une droite passant par un certain point central de la lentille, appelé *centre optique*, et par le point lumineux, en faisant avec l'axe principal un petit angle.

Centre optique. — Ce centre optique jouit de cette propriété que tout rayon lumineux qui passe dans l'intérieur de la lentille par ce point a sa direction d'émergence parallèle à la direction d'incidence. Voici comment on démontre son existence et comment on détermine sa position.

Par les centres des deux surfaces sphériques O et O′ menons à ces surfaces deux rayons parallèles OA, O′A′ (fig. 198); les plans tangents en A et A′ seront conséquemment parallèles, et un rayon lumineux qui traversera la lentille de A en A′ ou de A′ en A se trouvera exactement dans les mêmes conditions que s'il traversait une lame à faces parallèles. Ses directions d'inci-

dence et d'émergence SA, S'A' seront donc parallèles. Je dis actuellement que toutes les directions telles que AA' coupent l'axe principal au même point. En effet les triangles semblables OCA, O'CA' donnent

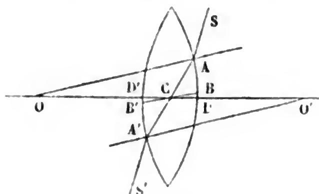


Fig. 198.

$$\frac{OC}{O'C} = \frac{AO}{A'O} = \frac{R}{R'},$$

R et R' étant les rayons des deux surfaces, relation qui est complétement indépendante des positions particulières du point A et par suite de A.

De plus, si le rayon intérieur fait un très-petit angle avec l'axe principal, on pourra admettre qu'il est perpendiculaire à la surface, car le point C pourra être pris pour centre de l'arc BD, et de l'arc B'D'; il n'y aura point alors de réfraction appréciable en B et en B', et le rayon traversera la lentille à la fois sans déviation et sans déplacement, exactement comme le rayon qui se propagerait suivant l'axe principal.

Une droite indéfinie ainsi menée par le centre optique et faisant avec l'axe principal un très-petit angle est ce que l'on appelle un *axe secondaire*. Cet axe jouit des mêmes propriétés que l'axe principal. Les positions relatives du point lumineux et de son foyer conjugué y sont exactement les mêmes.

Voici dès lors les cas qui peuvent se présenter pour les images (fig. 199) :

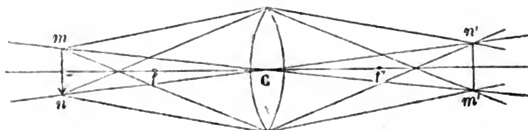


Fig. 199.

1[er] *Cas.* — L'objet *mn* placé au delà du foyer *f*.

Alors l'image *m'n'* est de l'autre côté de la lentille; elle est réelle et renversée par rapport à l'objet, comme toutes les images réelles. De plus, elle est plus petite que l'ob-

jet et placée entre f et $2f$, si l'objet est à une distance plus grande que $2f$; égale à l'objet et à la même distance de la lentille, si l'objet est précisément à la distance $2f$; plus grande que l'objet et à une distance supérieure à $2f$, si l'objet est placé entre f et $2f$. Enfin si l'objet était au foyer principal, il n'y aurait plus d'image saisissable, puisque les foyers conjugués qui devraient former cette image n'existent plus par suite du parallélisme des rayons.

Dans la lanterne magique, les dessins peints sur verre sont mis dans une position renversée devant une lentille, un peu au delà du foyer principal; ils sont éclairés par une petite lampe à réflecteur. Les images vont alors se peindre droites et agrandies sur un cadre placé à distance convenable de la lentille.

Le microscope solaire n'est autre chose qu'une lanterne magique dont les objets sont éclairés par les rayons du soleil. On peut aussi bien les éclairer par la lumière de Drummond ou avec la lumière électrique fournie par la pile entre les cônes de charbon.

Pour donner aux images de la chambre obscure une parfaite netteté, on adapte à l'ouverture une lentille convexe. Les objets, étant à une distance plus grande que le double de la distance focale, donnent au fond de la chambre, sur un écran en verre dépoli, l'image renversée et plus petite. Quant à la chambre elle-même, elle se compose d'une boîte fermée et noircie à l'intérieur; cette boîte présente sur l'une de ses faces une ouverture portant un tube garni d'une lentille convexe. La paroi opposée est formée par un verre dépoli. Nous verrons dans le cours de chimie comment, en substituant à cette plaque de verre une plaque d'argent ou une feuille de papier convenablement préparée, on peut fixer les images et obtenir les épreuves *photographiques* ou *daguerriennes*.

2ᵉ *Cas*.—L'objet m est à une distance moindre que la distance focale. Alors l'œil placé de l'autre côté de la lentille, aperçoit une image virtuelle, droite par rapport à l'objet, plus grande que lui et plus éloignée de la lentille, mais du même côté.

La lentille ainsi placée par rapport à l'objet forme ce que l'on appelle une *loupe* ou *microscope simple.*

Les lentilles biconvexes sont souvent nommées lentilles *convergentes*, parce qu'elles rendent les rayons convergents à leur sortie de la lentille, ou tout au moins diminuent leur divergence.

Lentilles concaves. — Quant aux lentilles concaves, elles augmentent, au contraire, la divergence des rayons et ne peuvent jamais fournir que des foyers virtuels plus rapprochés de la lentille que les points lumineux. Les rayons qui partent du point P suivent des directions telles que PII'S, PJJ'S' et s'écartent de plus en plus de l'axe; leurs directions prolongées rencontrent l'axe en p, qui devient alors pour l'œil un centre virtuel de rayonnement, un foyer virtuel (fig. 200). Aussi les lentilles concaves ne donnent-elles jamais, quand les rayons leur viennent directement des objets, que des images virtuelles, droites comme toutes les images virtuelles, plus petites que les objets, et plus rapprochées de la lentille. On leur donne souvent le nom de *lentilles divergentes*.

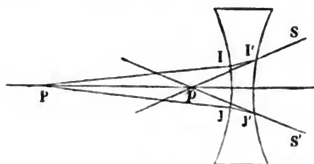


Fig. 200.

On peut vérifier ces différents principes en employant le même dispositif d'expérience que pour les miroirs. Seulement il faudra placer la bougie d'un côté de la lentille et chercher avec l'écran ou avec l'œil son image de l'autre côté. Les images virtuelles ne pourront être saisies que directement par l'œil.

On détermine le foyer d'une lentille convexe en dirigeant son axe principal vers le disque du soleil et cherchant, avec un écran en tôle, la position pour laquelle l'image est à la fois la plus petite et la plus nette. La détermination du foyer pour les lentilles biconcaves, se fait par un moyen analogue à celui qu'on emploie pour les miroirs convexes.

Les lentilles convergentes et divergentes servent à la construction d'une multitude d'instruments employés dans l'étude de l'histoire naturelle, de l'astronomie, ou dans leurs applications, tels que les lunettes, les microscopes, les télescopes.

On les emploie aussi pour corriger ces défauts de la vue qu'on appelle *Myopie* et *Presbytisme*. Nous reviendrons sur ces questions quand nous aurons traité du phénomène de la dispersion.

Décomposition de la lumière.— Spectre solaire.— Il ne nous reste plus maintenant qu'à parler de la modification particulière apportée à la lumière par son passage au travers d'un prisme, et des irisations que présentent les images vues par réfraction.

Si on fait passer par une *ouverture étroite* pratiquée dans le volet d'une chambre obscure un faisceau de rayons

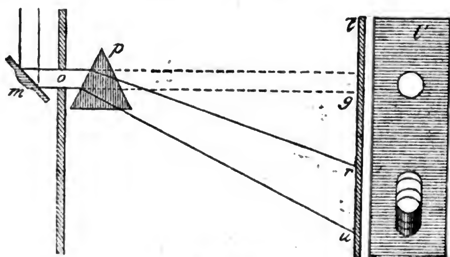


Fig. 201.

solaires, ces rayons vont dessiner sur le fond de la chambre une image blanche et ronde du soleil. Mais si sur le trajet de ces rayons on place un prisme dont l'arête soit en haut et horizontale (fig. 201), l'image se trouve déplacée verticalement du côté opposé à l'arête; en outre elle est déformée et allongée dans le sens de la déviation; enfin elle présente de haut en bas une succession de bandes horizontales colorées offrant les nuances suivantes : *rouge*, *orange*, *jaune*, *vert*, *bleu*, *bleu indigo*, *violet*. Si l'on place l'arête du prisme en bas, le déplacement et l'allongement de l'image se feront de bas en haut, et

les bandes colorées se succéderont de bas en haut dans l'ordre indiqué. En plaçant le prisme vertical et mettant son arête à droite ou à gauche de l'ouverture, la déviation provenant de la réfraction et la dispersion de l'image colorée se feraient de droite à gauche, ou de gauche à droite, le violet étant toujours la couleur la plus déviée, et le rouge la couleur qui l'est le moins.

C'est là ce qu'on appelle en physique le *spectre solaire.* Voici l'explication que Newton a donnée de ce phénomène : Ces rayons diversement colorés existent dans la lumière blanche et sont inégalement réfrangibles. Les rayons rouges sont ceux que les milieux réfringents dévient le moins de leur direction première ; les rayons violets sont ceux qui se réfractent le plus; les autres rayons éprouvent, dans l'ordre suivant lequel nous les avons nommés, des déviations intermédiaires. Le passage dans un milieu réfringent quelconque, sous une incidence autre que l'incidence perpendiculaire, aura dès lors pour effet de les séparer en leur donnant à leur sortie des directions différentes.

On peut facilement se convaincre de l'inégale réfrangibilité des rayons du spectre en recevant l'image colorée sur un écran percé d'un très-petit trou, derrière lequel on a mis un autre prisme parallèle au premier (fig.202).

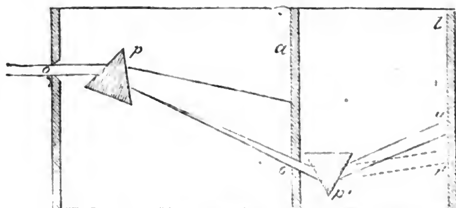


Fig. 202.

On fait alors tourner le premier prisme de manière à faire passer successivement par le trou et par le second prisme les différents rayons colorés ; on voit alors que le rayon émergent du second prisme donne une image *unicolore*, ce qui prouve que les rayons du spectre sont in-

décomposables; et, en outre, cette image s'abaisse de plus en plus, en même temps que sa couleur passe, par le déplacement du prisme, du violet au rouge. On peut encore placer derrière le premier prisme horizontal un second prisme ayant ses arêtes verticales. L'image colorée fournie par le premier prisme est alors rejetée latéralement, sans altération des couleurs, et l'on voit, en comparant la position nouvelle du spectre à sa position primitive, que chacune des bandes colorées, depuis le rouge jusqu'au violet, se trouve transportée horizontalement à une distance graduellement croissante, de telle sorte que la partie violette se trouve la plus écartée. Le nouveau spectre fait avec l'ancien un angle plus ou moins grand, suivant la grandeur de l'angle du second prisme.

Si donc on regarde à travers un prisme horizontal dont le sommet soit en haut, une bande horizontale formée de deux bandes, l'une bleue, l'autre rouge, ajustées bout à bout, elles ne paraîtront plus à la suite l'une de l'autre : la bande bleue apparaîtra plus haut que la bande rouge ; et c'est ce que l'on observe en effet.

Si l'on reçoit le faisceau dispersé émanant du prisme sur un miroir concave, l'image formée au foyer redevient blanche par la superposition des rayons. Il en serait de même si on faisait passer le faisceau au travers d'une lentille convergente. Mais si on intercepte un certain nombre des rayons, alors l'image n'est plus blanche; elle présente une teinte composée. Si on intercepte les rayons qui ont formé cette image colorée en laissant les autres rayons libres, on obtient une seconde teinte colorée différente de la première et qu'on appelle sa *complémentaire*, parce qu'en les réunissant on forme du blanc.

On peut faire encore une expérience très-simple pour montrer la recomposition de la lumière blanche par la superposition des couleurs du spectre. Cette expérience est fondée sur le phénomène de la persistance des impressions produites par la lumière sur l'organe de la vue. Tout le monde sait que, lorsqu'on fait tourner un charbon rouge avec une vitesse un peu grande, on aperçoit une

circonférence lumineuse. Cela tient précisément à ce phénomène de la persistance. Supposons que l'impression dure une seconde et que le charbon fasse un tour entier pendant ce laps de temps ; les impressions produites par le corps lumineux dans ses différentes positions coexistent dans l'œil au moment où le charbon finit sa révolution, puisque la première dure autant que cette révolution. On doit donc voir le charbon comme s'il était dans toutes ces positions au même instant.

Pour faire l'expérience de la recomposition de la lumière blanche, on partage un cercle de carton en quatre secteurs à peu près égaux, que l'on divise eux-mêmes en sept secteurs auxquels on donne les couleurs du spectre. Si l'on fait alors tourner ce carton rapidement autour de son centre, la succession des diverses tranches colorées devant l'œil, donne lieu à une superposition des sensations due précisément à leur persistance, et fait paraître la surface du cercle d'une teinte uniforme, blanche, ou plutôt un peu grisâtre, parce que l'imitation du spectre est très-imparfaite et qu'on se borne à mettre sept couleurs, tandis que dans le spectre il y a en réalité une infinité de nuances passant l'une à l'autre par des transitions insensibles.

Couleurs des corps. — Nous avons dit, en commençant ce chapitre, qu'il n'existait pas de corps doué d'une transparence parfaite, c'est-à-dire qui transmît sans absorption intérieure la lumière qui le traverse. Pour certaines substances, au moins quand on les prend sous une faible épaisseur, l'absorption se fait dans le même rapport sur les différents rayons qui composent la lumière blanche, de telle sorte que le faisceau émergent est identique pour la couleur, sinon pour l'intensité, au faisceau incident. Mais il existe des corps qui exercent cette action absorbante très-inégalement sur les différents rayons. Il en résulte que le faisceau émergent est coloré. Ainsi le corps paraîtra vert par transparence, s'il absorbe tous les rayons du spectre, excepté les rayons jaunes et les rayons bleus.

La réflexion irrégulière ou diffusion est aussi accompagnée d'une absorption analogue qui se fait dans la

couche superficielle et qui donne aux corps leur couleur par réflexion. Un corps est vert par réflexion, soit parce qu'il réfléchit les rayons verts du spectre en proportion beaucoup plus forte que les autres rayons, soit parce qu'il réfléchit de même en excès le bleu et le jaune.

On comprend ainsi comment un corps éclairé par de la lumière blanche peut nous paraître coloré. Un corps qui ne transmet que les rayons rouges serait noir si on l'éclairait avec de la lumière bleue.

La coloration des images fournies par les prismes s'expliquera maintenant sans difficulté. Si l'on fait arriver par une fente rectangulaire étroite un faisceau de rayons parallèles et si on le fait tomber sur un prisme dont les arêtes soient parallèles à la fente, chacun des faisceaux de lumière violette, bleue, verte, jaune, etc., dont l'ensemble constitue la lumière blanche se trouve réfracté, et subit une déviation qui grandit avec la réfrangibilité du rayon; chacun d'eux viendra former sur un écran une image de la fente. Ainsi l'on aura une série continue d'images de cette fente, placées à côté les unes des autres suivant l'ordre de réfrangibilité des rayons.

Si la fente est large, les spectres formés par les bandes étroites dans lesquelles on peut la décomposer se superposeront dans la région moyenne de l'image qui apparaîtra blanche; mais dans la partie la plus déviée de cette image se présenteront des bandes colorées résultant d'une superposition incomplète et le violet pur formera la limite extrême de cette image. Dans la partie la moins déviée du spectre on verra d'autres irisations dues également à une superposition incomplète, et là ce seront les couleurs formées des rayons les moins réfrangibles; le rouge pur formera la seconde limite.

On aurait le même résultat en regardant au travers d'un prisme une bande de papier blanc collée sur un fond noir. En regardant au contraire une bande de papier noir sur un fond blanc, les irisations se reproduiraient en sens inverse, le violet et le rouge débordant vers l'intérieur de l'image. Il est évident en effet que dans ce cas

ce n'est point l'objet noir qui donne les irisations, mais le fond blanc qui le limite en haut et en bas.

Si l'on place devant l'ouverture de la chambre obscure un verre coloré susceptible d'absorber complétement certains des rayons du spectre, on obtiendra encore un spectre mais incomplet et où la place des couleurs absentes sera marquée par une bande noire.

En examinant à travers un prisme certaines flammes colorées, on obtient ainsi des spectres incomplets. On peut même avoir des flammes monochromes, c'est-à-dire dont le spectre se réduit à une seule couleur.

Si maintenant on regarde un objet coloré d'une certaine largeur, la partie centrale de l'image aura la couleur de l'objet. Mais sur les deux bords de l'image, dans le sens de la déviation, apparaîtront des irisations formées exactement comme celles que donne un objet blanc, sauf la variations de nuances résultant de l'absence de telles ou telles couleurs dans la couleur composée du corps. Si le corps est du vert même du spectre, il n'y aura évidemment pas d'irisation. Si le corps est vert, mais du vert formé par la combinaison du jaune et du bleu, il y aura une bande jaune à la région la moins déviée de l'image, et une bande bleue à la région la plus déviée.

Les images formées par les lentilles sont également irisées sur leurs bords. Il est évident en effet que les rayons de diverses couleurs ayant des indices de réfraction différents les cônes des rayons réfractés auront leurs sommets à des distances inégales de la lentille. Le foyer violet en sera plus rapproché que le foyer indigo, puis viendra le foyer bleu, puis le foyer vert, jusqu'au foyer rouge, qui sera le plus éloigné. Ces cônes se superposeront en partie de telle sorte que la région centrale de l'image sera de la même couleur que le faisceau qui tombe sur la lentille. Mais tout autour seront des irisations dont la couleur extérieure sera le violet, ou la couleur la plus réfrangible, quand on éloignera l'écran de la lentille ; le rouge au contraire, ou la couleur la moins réfrangible, quand on rapprochera l'écran.

Achromatisme.— On a cru pendant longtemps qu'il était impossible de détruire la dispersion, en rendant parallèles les rayons diversement colorés qui émergent d'un prisme ou d'une lentille, sans détruire en même temps la réfraction. On croyait en effet, par suite de mesures inexactes, que les angles de déviation pour deux couleurs, le rouge et le violet par exemple, variaient dans un même rapport, d'une substance à une autre, et que par suite la différence de ces angles variait aussi proportionnellement à leurs valeurs. On ne pouvait donc annuler cette différence qu'en annulant la déviation elle-même. Toutefois Euler faisant remarquer que l'œil donne des images achromatiques, c'est-à-dire sans irisations, bien que ces images soient formées par réfraction, se crut en droit d'affirmer qu'il devait être possible d'*achromatiser* les images fournies par les lentilles, et en général par les systèmes réfringents, et en effet un habile opticien anglais, Dollond, trouva quelques années après qu'en ajustant ensemble une lentille biconvexe et une lentille biconcave, l'une en verre ordinaire (crown-glass), l'autre en verre à base de plomb ou cristal (flint-glass), le système restait convergent, bien que les irisations des images fussent à peu près complétement détruites. En ajustant de même, face contre face, mais en sens contraire, deux prismes, l'un en crown-glass, l'autre en flint-glass, d'angles convenables, on arrive également, sans détruire la déviation, à produire un achromatisme à peu près complet. Pour obtenir un achromatisme satisfaisant, il ne suffit pas de réunir au même point l'image violette et l'image rouge. Il faudrait que cette même condition fût remplie pour toutes les autres couleurs. On se borne à la remplir pour le violet, le rouge, et la couleur la plus brillante du spectre, le jaune, ce qui exige l'emploi de trois lentilles ou de trois prismes. Toutefois on se contente très-souvent de deux.

De l'œil. — L'organe de la vision chez l'homme est un globe membraneux, partagé en deux chambres complétement séparées et remplies par des liquides transparents. L'enveloppe membraneuse de l'œil, appelée *sclérotique* ou *cornée opaque*, laisse à la partie antérieure un vide circulaire sur les bords duquel se trouve soudée une membrane transparente et un peu plus fortement bombée, qu'on appelle la *cornée transparente*; une couronne enchâssant une sorte de lentille biconvexe transparente appelée *cristallin* forme la séparation des deux chambres de l'œil. Dans la chambre antérieure une cloi-

son opaque, percée d'un trou rond en son centre, forme, devant le cristallin, un diaphragme qui ne laisse arriver les rayons que sur la partie centrale de la lentille. Le trou central est ce que l'on nomme la *pupille*. La cloison elle-même se nomme l'*iris*. On y remarque deux séries de fibres, les unes ayant une disposition rayonnante, et qui en se contractant agrandissent la pupille, les autres concentriques qui, en se contractant à la façon des cordons d'un sac, en rétrécissent l'ouverture.

Toute cette chambre antérieure est remplie d'une liqueur appelée *humeur aqueuse*. La chambre postérieure en arrière du cristallin est occupée par une sorte de gelée d'une transparence parfaite qu'on nomme l'*humeur vitrée*. Un nerf spécial, le nerf optique, traverse le fond de la sclérotique qui est tapissé à l'intérieur d'un enduit noir, et vient s'épanouir en une multitude de petits filets nerveux formant comme une sorte de réseau que l'on appelle la *rétine*. C'est la rétine qui reçoit l'impression de la lumière, et le nerf optique qui la transmet au cerveau; quant au phénomène de la perception, il n'est plus du ressort de la physique ni même de la physiologie.

On voit que l'appareil de la vision se compose d'une lentille convergente comprise entre deux ménisques également convergents. Ainsi le faisceau divergent qui tombe sur la cornée transparente devient convergent en traversant l'humeur aqueuse, plus convergent encore en traversant le cristallin : enfin en passant du cristallin dans l'humeur vitrée dont le pouvoir réfringent est moins grand, il éprouve une nouvelle augmentation dans sa convergence, et vient former son foyer rétine, ou un peu en deçà, ou au contraire un peu au delà, suivant la position du point de départ des rayons.

L'œil se comporte comme une chambre obscure armée d'un système de lentilles convergentes. Pour une position convenable de l'objet, l'image se forme réelle, renversée, et plus petite que l'objet sur la rétine.

Maintenant, si l'on remarque que l'image formée, par une lentille biconvexe, d'un objet situé au delà du double de la distance focale, ne se déplace que d'une quantité égale à cette distance f, lorsque l'objet passe de la distance $2f$ à une distance infinie, que par conséquent, pour un déplacement assez notable de l'objet, les foyers de chacun de ces points lumineux ne doivent changer que très-peu ; en second lieu, que l'œil paraît être doué de la faculté de s'allonger ou de se contracter d'avant en arrière, ce qui approche ou éloigne la rétine du

cristallin ; enfin, que le cristallin n'est pas homogène et que suivant que l'iris s'ouvre plus ou moins les rayons traversant des couches plus ou moins fortement convergentes, forment leur foyer plus ou moins loin du cristallin, on comprendra que grâce, à ces diverses circonstances, on puisse voir à peu près avec le même degré de netteté des objets très-inégalement éloignés de l'œil.

Myopie et presbytisme. — Lorsque la courbure de la cornée transparente est trop forte, ou que les milieux transparents de l'œil ont un pouvoir réfringent trop grand, les faisceaux réfractés, trop fortement convergents, forment leurs foyers bien en avant de la rétine, surtout si l'objet qui les envoie est un peu éloigné de l'œil. Les images produites sur la rétine perdent alors toute leur netteté. On appelle *myopie* ce défaut de la vue, et on le corrige en mettant en avant de l'œil une lentille divergente qui, augmentant la divergence des rayons à leur arrivée sur la cornée, les place dans le même cas que s'ils partaient d'un point plus rapproché, ce qui a pour effet de reporter l'image sur la rétine, ou tout au moins assez près pour qu'elle reprenne sa netteté.

Si au contraire la courbure de la cornée était trop faible, ou les milieux de l'œil trop peu réfringents, les faisceaux réfractés, trop faiblement convergents, ne pourraient former leurs foyers qu'en arrière de la lentille, et d'autant plus loin en arrière que l'objet serait plus rapproché de l'œil. C'est ce que l'on appelle le *presbytisme.* On le corrige en plaçant devant l'œil une lentille convergente qui, donnant à l'avance aux faisceaux un certain degré de convergence, rapproche par cela même leur foyer.

Stéréoscope. — Lorsque nous examinons un objet placé devant nous à la distance de la vue distincte, successivement avec l'œil droit et avec l'œil gauche, nous ne voyons pas ce objet sous le même aspect dans les deux cas. C'est cette double impression qui, concurremment avec la distribution des ombres, nous donne la notion de la forme des corps et surtout de leur relief. Lorsque nous regardons un dessin, quelque bien fait qu'il soit, nous ne voyons avec nos deux yeux que la même image, et ce n'est plus que par l'habile répartition des ombres et des lumières que le peintre peut nous faire deviner le relief, la forme solide. Mais si l'on présente à nos yeux deux dessins distincts du même objet, dessinés de deux points de vue différents, tels que les droites menées de ces points à l'objet fassent un angle de 11 à 12 degrés, en plaçant ces dessins de

telle sorte que l'œil droit voie l'image tracée du point de vue de droite, l'œil gauche, l'image tracée du point de vue de gauche, et que de plus, les rayons qui arrivent à nos yeux soient déviés, soit par réflexion, soit par réfraction, de manière que les images, substituées par là aux dessins, viennent se former en un même point de l'espace, alors nous nous trouverons avoir reproduit par cet artifice les conditions ordinaires de la vue. Tout se passera comme s'il y avait en ce point un objet dont chacun de nos yeux nous donnerait une perspective particulière, et nous aurons l'impression du relief avec une vérité prodigieuse.

C'est à ce résultat que l'on parvient à l'aide du stéréoscope. Deux épreuves photographiques *ab*, *bc* du même sujet (fig. 203) sont prises simultanément à l'aide de deux chambres obscures convenablement espacées, eu égard à la distance qui les sépare du modèle. Ces deux épreuves rapprochées sur un même carton sont placées au fond d'une boîte, éclairée par une ouverture latérale. Cette boîte porte deux tubes dirigés vers les dessins, et armés de deux petits prismes dont les sommets sont tournés l'un vers l'autre. Le passage des rayons, venant des divers points lumineux d'un des dessins à travers le prisme correspondant, a pour résultat de porter l'image virtuelle vers le sommet du prisme, de gauche à droite pour le prisme de gauche, de droite à gauche pour le prisme de droite. En réglant convenablement la distance des prismes aux dessins, leur écartement et leur angle, on peut arriver à faire superposer les deux images virtuelles en *de* sans qu'elles coïncident, bien entendu, puisqu'elles ne sont pas identiques. C'est de la formation de ces deux images virtuelles, perçues séparément par chacun des yeux en un même point de l'espace, que résulte l'effet prodigieux de relief que produisent les images stéréoscopiques.

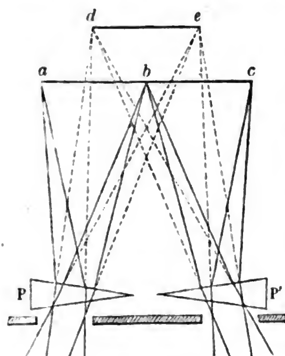


Fig. 203.

Instruments d'optique. — Lorsque nous avons à examiner des sujets de très-petite dimension placés à la distance de la vue distincte, comme un insecte, ou certains organes

délicats d'une fleur, ou bien encore des objets d'un gros volume mais vus à une immense distance, nous éprouvons la même impossibilité à voir nettement leurs diverses parties : l'angle sous lequel nous les voyons est beaucoup trop petit.

Loupe. — Pour les objets qui sont à notre portée, nous pouvons vaincre cette difficulté en les examinant à l'aide d'une lentille biconvexe, achromatique ou non, que nous plaçons à une distance de l'objet moindre que la distance focale principale. Employée de cette façon la lentille prend, comme nous l'avons déjà dit, le nom de *loupe* ou de microscope simple. Voici en quoi consiste le service qu'elle nous rend. Pour voir l'objet sous un plus grand angle, il faudrait le placer très-près de l'œil, mais alors l'image ne se formerait plus dans l'organe sur la rétine; elle devrait se former en arrière. La loupe en changeant la direction des rayons les amène à l'œil comme s'ils partaient des différents points de l'image virtuelle située en arrière de l'objet, image qui est vue sous le même angle apparent que l'objet lui-même. Or on peut toujours, en réglant convenablement la position de la loupe, obtenir que l'image virtuelle soit à la distance de la vue distincte. On aura donc agrandi l'angle apparent sans compromettre la netteté de la vision.

Si le grossissement obtenu de cette façon n'est pas suffisant, on recourt alors au microscope composé, dont l'invention date de la fin du XVIe siècle et est attribuée à Z. Jansen de Middlebourg.

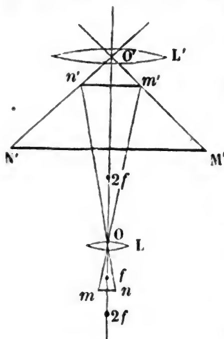


Fig. 204.

Microscope composé. — Dans le microscope composé on examine avec une loupe appelée *oculaire*, non pas l'objet lui-même, mais une image réelle et agrandie de cet objet, donnée par une première lentille biconvexe, nommée l'*objectif*.

L'objet à étudier *mn* (fig. 204) est placé sous l'objectif à une distance un peu plus grande que la distance focale, mais moindre que son double. Les rayons réfractés forment alors de l'autre côté de la lentille et à une distance plus grande que $2f$ une image $m'n'$, réelle, renversée et agrandie. Les rayons continuant leur route tombent alors sur l'oculaire placé au delà de $m'n'$ et à une distance moindre

que la distance focale de cette nouvelle lentille. L'œil placé derrière l'oculaire voit une image virtuelle M'N', droite par rapport à *m'n'*, renversée par rapport à l'objet *mn*.

En réglant convenablement la distance de *mn* à l'objectif L et la distance des deux lentilles L et L', on arrivera à faire former l'image virtuelle à la distance de la vue distincte.

Voici ce que l'on a gagné à cette disposition ; à l'angle apparent *m o n* encore trop petit, on a substitué l'angle M'O'N' tout en maintenant la netteté de la vision. Si l'image *m'n'* a un diamètre égal à 20 fois celui de l'objet, et si M' N' a quatre fois le diamètre de *m'n'*, le grossissement total en diamètre sera évidemment 80, et le grossissement en surface 6400.

L'objectif *a* (fig. 205) est porté par un tube A rétréci à sa partie inférieure. Ce tube est soutenu par un anneau fixé à un pied T. Le *porte-objet dd* est une petite tablette liée à un curseur *c* que l'on peut faire glisser sur le pied et fixer à une position convenable au moyen d'une vis de pression. Cette tablette est percée d'un trou qui permet d'éclairer par réflexion, au moyen d'un miroir *m*, l'objet placé entre deux lames minces de verre. Quand cet objet est opaque, on l'éclaire en dessus à l'aide d'une lentille *n*. L'oculaire *b* est établi à la partie supérieure d'un tube B qui glisse à frottement doux dans le premier tube A. Une lentille *g* aide à achromatiser les images.

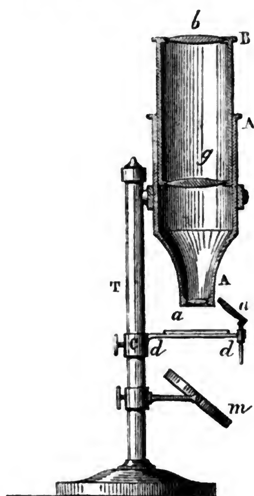


Fig. 205.

Il nous serait impossible d'entrer dans de plus grands détails sur ce précieux instrument qui a fait faire tant de progrès aux sciences d'observations. Nous renverrons pour une description plus minutieuse au traité de physique de M. Pouillet, t. II.

Télescope. — Pour l'étude des objets placés à grande distance, on fait usage du télescope ou des lunettes.

Avec le télescope on examine à la loupe l'image réelle d'un objet éloigné, formée par la réflexion des rayons sur un miroir concave, placé au fond d'un large tube cylindrique noirci à l'inté-

rieur. Dans le télescope d'Herschell l'image vient se former à l'entrée de ce tube et un peu sur le côté, de telle sorte que l'observateur, sans craindre de masquer la bouche du tube et d'intercepter en quantité sensible les rayons venant de l'astre, peut regarder à travers une lentille faisant l'office de loupe les diverses parties de l'image. Dans le télescope de Newton les rayons, après leur réflexion sur le miroir concave, sont rejetés de côté par la réflexion sur un miroir plan incliné à 45° sur l'axe du cylindre. L'image réelle vient alors se former près de la paroi du tube devant une loupe montée sur cette paroi.

L'inconvénient de ces deux dispositions est que l'observateur tourne le dos, ou tout au moins le flanc, à la région du ciel qu'il observe, ce qui rend moins facile et moins sûr le maniement de l'instrument; en outre les images sont renversées.

Le télescope de Grégory est disposé autrement. L'image réelle *mn* (fig. 206), donnée par la réflexion sur le miroir con-

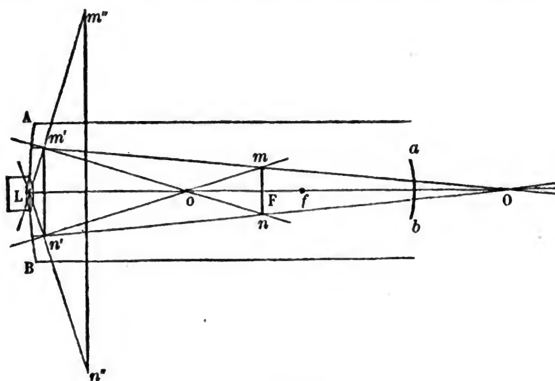


Fig. 206.

cave qui occupe le fond du tube, se forme en présence d'un second miroir concave très-petit *ab*, entre le centre *o* et le foyer principal *f* de ce miroir, de telle sorte que les rayons continuant leur route, après la formation de la première image *mn*, tombent sur *ab*, s'y réfléchissent, et vont former en *m'n'* au delà du centre *o* une image réelle encore, renversée par rapport à *mn*, droite conséquemment par rapport à l'objet. C'est

cette image $m'n'$ que l'on regarde avec une petite loupe L', montée dans une ouverture percée au milieu du miroir AB. En réglant convenablement la distance des deux miroirs AB et *ab*, et la position de la loupe, on fera former l'image virtuelle $m''n''$ à la distance de la vue distincte.

Cassegrain a substitué au miroir concave *ab* un miroir convexe placé en avant de la position *mn*, et qui recevant des faisceaux convergents, peut alors former une image réelle que l'on examine de la même façon à la loupe. Cet agencement diminue notablement la longueur de l'instrument.

L'invention du télescope est postérieure à celle du microscope, mais de quelques années seulement. Elle est due encore à Jansen, ou peut-être à J. Metzu, opticien hollandais comme lui.

Lunettes. — Lunette astronomique. — Les lunettes jouent le même rôle que le télescope; mais l'image réelle que l'on regarde à la loupe, au lieu d'être formée par réflexion, est formée par réfraction, comme dans le microscope.

La lunette astronomique se compose d'un système de deux tubes glissant à frottement doux l'un dans l'autre. L'un d'eux porte la lentille biconvexe L, appelée objectif, et tournée vers l'astre (fig. 207) : l'image réelle et renversée *mn* se forme au

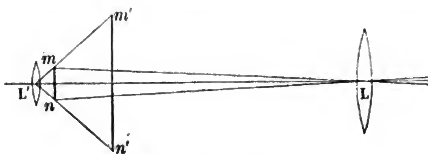


Fig. 207.

foyer, vu l'immense éloignement de l'objet. Le second tube porte l'oculaire L', faisant office de loupe, et placé par conséquent à une distance de *mn* moindre que la distance focale principale. On règle sa position de telle sorte que l'image virtuelle $m'n'$ soit à la distance de la vue distincte.

Lunette terrestre. — Pour rendre l'image droite par rapport à l'objet, on établit dans le tube qui porte l'oculaire un système de deux lentilles biconvexes égales. L'image réelle et renversée *mn* fournie par l'objectif (fig. 208), se trouve au foyer d'une lentille P qui donne aux rayons venant de *m* une direction d'émergence parallèle à l'axe secondaire *ma*. Ces

rayons parallèles tombant alors sur la seconde lentille Q, vont former, après l'avoir traversée, leur foyer en m' sur l'axe secondaire $m'b$ parallèle à la direction d'incidence des rayons. Les rayons partis de n suivent une marche analogue et viennent former leur foyer en n'. On obtient ainsi une image $m'n'$ renversée par rapport à mn, et par conséquent droite par rapport à l'objet lui-même. C'est devant cette image $m'n'$ qu'est placé l'oculaire.

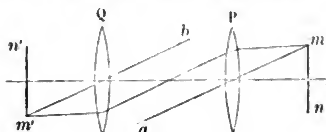


Fig. 208.

L'addition de ces deux verres, et souvent même d'un troisième qui sert à rendre l'image achromatique, donne à ce système de lunette, appelé *lunette terrestre*, une longueur très-incommode, surtout pour un instrument destiné à être transporté et manœuvré à la main.

Lunette de Galilée. — L'emploi d'un oculaire divergent fait disparaître tous ces inconvénients. L'objectif biconvexe L (fig. 209), tourné vers l'objet éloigné, donnerait en mn une

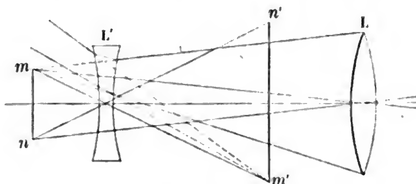


Fig. 209.

image réelle et renversée placée sensiblement au foyer. La lentille biconcave oculaire L', placée sur le passage des rayons convergents avant leur croisement, change brusquement leur direction. Ainsi le faisceau conique dont le sommet réel serait en m devient, après son passage à travers l'oculaire, divergent par rapport à l'axe secondaire mm', de telle sorte que l'œil reçoit ses rayons comme s'ils lui venaient du point m'. De même le faisceau qui devrait former son foyer en n, donne, après avoir traversé l'oculaire un foyer virtuel en n'. On obtient ainsi une image virtuelle $m'n'$, renversée par rapport à mn, et conséquemment droite par rapport à l'objet.

L'usage des lentilles, pour remédier aux défauts du presbytisme et de la myopie, remonte à la fin du XIIe siècle, au moins en Europe, car les Chinois paraissent les avoir employées depuis un temps beaucoup plus long.

La lunette dite de Galilée a été inventée par Metzu en 1609, et modifiée par Galilée en 1610. C'est à Képler que l'on doit la lunette astronomique et au père Reitha qu'est due l'invention de la lunette terrestre. Tous ces instruments construits dans la première moitié du XVIIe siècle ont contribué puissamment aux grandes découvertes faites en astronomie, bien que l'art de travailler le verre fût encore pour ainsi dire dans l'enfance, et que l'on fût loin alors d'établir des lunettes ou des télescopes qui approchassent le moins du monde des instruments que l'on construit aujourd'hui. Pour le génie il n'y a point de mauvais instruments.

CHAPITRE XIX.

PROBLÈMES DE PHYSIQUE.

Nous donnons dans ce chapitre la solution de quelques problèmes où l'on trouvera l'application des principes les plus importants sur les densités, les dilatations, les chaleurs spécifiques, les chaleurs latentes. Nous pensons ainsi pouvoir donner aux jeunes gens qui liront notre livre la marche à suivre pour résoudre les questions qui peuvent leur être présentées dans les concours. Il leur sera d'ailleurs facile, en modifiant les données et en renversant les énoncés, de multiplier ces problèmes, que nous avons dû restreindre beaucoup, puisque nous n'avons en vue que la méthode.

PREMIÈRE QUESTION.

On donne un cube de cuivre pesant 65gr,35. Quelle quantité de métal faudrait-il enlever au tour pour en faire une sphère dont le diamètre serait les $\frac{2}{3}$ du côté du cube ?

Convenons, pour un moment, de prendre pour unité de poids le poids du cube ; par suite, pour unité de volume son volume, pour unité de longueur la longeur de son côté. Le diamètre de la sphère serait $\frac{2}{3}$ et son volume $\frac{4}{3}\pi\left(\frac{1}{3}\right)^3$. Le volume enlevé serait donc $1 - \frac{4}{3}\pi\left(\frac{1}{3}\right)^3$. Ce nombre représenterait aussi le poids enlevé, puisque le poids de l'unité de volume choisie est l'unité de poids.

Maintenant cette unité de poids choisie momentanément pèse en réalité 65gr,35, donc le poids de cuivre enlevé par le tour est $65{,}35 \times \left[1 - \frac{4}{3}\pi\left(\frac{1}{3}\right)^3\right] = 35^{gr}{,}22.$

DEUXIÈME QUESTION.

Un vase en verre contient, à 10°, 835gr,15 de mercure; quelle est sa capacité à 0°?

Densité du mercure à 0°	13,597
Coefficient de dilatation du mercure........	0,00018
— — du verre..........	0,0000258

Si nous nous reportons aux principes posés sur la dilatation, nous y voyons que si V représente le volume, D la densité d'une masse de mercure à une certaine température t; V', D', son volume et sa densité à une autre température t', on a

$$\frac{D}{D'} = \frac{V'}{V} = \frac{1+kt'}{1+kt}.$$

En effet, chacune des unités de volume dont se compose le volume V ramenée à zéro, devient, d'après la définition même du coefficient k, à t^{o}, $1+kt$; à t'^{o}, $1+kt'$; donc les volumes V et V' sont dans le rapport de $1+kt$ à $1+kt'$, et par suite les densités sont dans le rapport inverse. Si donc 835gr,15 est le poids de mercure à 10° qui remplit le flacon, le poids de mercure à 0° qui remplirait le même flacon, conservant la même capacité, serait

$$835^{gr},15 \times \frac{1+0,00018\times 10}{1+0,00018\times 0} = 835,15 \times 1,0018.$$

Tel serait donc le poids de mercure à 0° qui remplirait le flacon, conservant la capacité qu'il a à 10°. Mais en descendant à zéro, la capacité du flacon diminue dans le rapport de $1+k't$ à 1, et le poids de mercure qui la remplit varie évidemment dans le même rapport; ainsi ce poids n'est plus que

$$\frac{835,15\times 1,0018}{1,000258}.$$

Tel est donc le poids du mercure à zéro qui remplit le flacon aussi à zéro. Ce poids, divisé par la densité donnée du mercure, fournit pour quotient le volume de ce mercure, c'est-à-dire la capacité du flacon, capacité qui est alors en centimètres cubes :

$$\frac{835,15\times 1,0018}{1,000258\times 13,597} = 60^{c.c},782.$$

TROISIÈME QUESTION.

Un litre d'air pèse à 0° sous la pression de 0m,760, 1gr,293; que pèse-t-il à 20° sous la pression de 0m,741? Coefficient de l'air, 0,00367.

Ne nous occupons d'abord que du changement de pression, et laissons la température constante. Nous aurons pour le poids du litre d'air à 0° sous la pression $0^m,741$

$$1^{gr},293.\ \frac{0,\ 741}{0,\ 760}.$$

Maintenant, en appliquant à l'air le même raisonnement que nous employions pour le mercure dans la question précédente, nous aurons pour le poids du litre d'air à la pression 0,741 et à la température 20° :

$$1,293.\ \frac{0,741}{0,760}\cdot\frac{1+0,00367\times 0}{1+0,00367\times 20};$$

ou

$$\frac{1,293\times 0,741}{0,760\times 1,0734}=1^{gr},174.$$

QUATRIÈME QUESTION.

La densité de la vapeur d'eau étant les 0,622 de celle de l'air dans les mêmes conditions de température et de pression, quel serait le poids de la vapeur qui saturerait 1 mètre cube d'air à 20°?

A 20°, la tension maximum de la vapeur d'eau est $17^{mm},39$. Je vais donc chercher, en suivant la marche du problème précédent, le poids de 1 mètre cube, ou mille litres d'air à 20° sous la pression de $0^m,01739$, et je multiplierai le résultat par 0,622. Le nombre cherché est donc

$$\frac{1^{kg},293\times 0,01739\times 0,622}{0,760\times 1,0734}=0^{kg},01714.$$

CINQUIÈME QUESTION.

Quel serait le poids de glace que pourrait fondre sans élévation de température 1 kilogramme de vapeur d'eau à 100° qui se mêlerait à la glace en se liquéfiant?

Nous avons dit que 1 kilogramme de vapeur à 100° qui devient eau à 100°, serait susceptible de porter de 0° à 100°, 5 kil.,36 d'eau, ou de 0° à 1° 536 kilogrammes d'eau ; il abandonne donc 536 unités de chaleur; il en abandonne 100 autres quand il descend, à l'état d'eau liquide, de 100° à 0°. C'est donc en tout 636 unités de chaleur qu'il perd; or, 1 kilogramme de glace qui fond exige 79 unités de chaleur.

Donc, si 79 unités de chaleur fondent 1^{kg} de glace,

une unité de chaleur fond $\frac{1^{kg}}{79}$,

et 636 unités de chaleur $\frac{636^{kg}}{79}$, ou $8^{kg},057$.

SIXIÈME QUESTION.

Dans un vase en laiton, pesant 75^{gr}, et contenant une masse d'eau à 20°, qui pèse 522^{gr}, on jette un morceau de glace à 0°. La glace fondue, la température du mélange est 17°,8, et le poids total de l'eau 534^{gr}. Quel est le calorique de fusion de la glace (chaleur spécifique du laiton 0,094)?

La chaleur cédée par l'eau est $522 \times (20-17°,8) = 522 \times 2,2$ unités de chaleur.

La chaleur cédée par le vase qui se refroidit avec l'eau est $75 \times 0,094 \times 2,2$ unités de chaleur.

En tout, produits et sommes effectués, 1163,91.

De cette somme de calories, si nous retranchons la somme de chaleur nécessaire pour porter l'eau résultant de la fusion de la glace de 0° à 17°8, il restera évidemment la quantité de chaleur qui a déterminé cette fusion. Or, la glace pèse 534—522 ou 12 grammes; 12 grammes d'eau, en passant de 0 à 17°,8, absorbent $12 \times 17,8$ unités de chaleur ou 213,6. Ainsi, 1163,91—213,6 ou 950,31 unités de chaleur ont été nécessaires pour fondre 12 gramme de glace. Il faut donc, pour fondre 1 gramme, $\frac{950,31}{12} = 79,2$ unités de chaleur.

SEPTIÈME QUESTION.

Quelle quantité de vapeur d'eau à 100° faudrait-il faire condenser dans une cuve cylindrique de 2 mètres de hauteur et de 1,25 de diamètre, pleine d'eau à 10°, pour amener la masse totale à la température de 50°?

Commençons d'abord par calculer le volume et le poids de l'eau.

$$\text{Base du cylindre } \frac{\pi.(1,25)^2}{4}$$

$$\text{Volume } \frac{\pi(1,25)^2}{4} 2 = \frac{\pi(1,25)^2}{2} = 2,454375$$

La densité de l'eau à 10° est, d'après les tables de M. Des-

pretz, 0,999731. — Un mètre cube d'eau pèse donc, dans ces conditions, $999^k,731$. Notre masse d'eau pèse alors $999^k,731 \times 2,454375$ ou $2453^k,711$.

Pour monter de 10° à 50°, cette masse exige une quantité de chaleur égale à $2453,711 \times 40$ calories $= 98148,44$.

Or, 1 kilogramme de vapeur à 100°, qui devient eau à 100°, abandonne 536 unités de chaleur, et en descendant ensuite à 50°, il abandonne encore 50 unités de chaleur ; c'est donc en tout 586 unités de chaleur abandonnées.

Ainsi, pour fournir 586 calories, il faut 1 kilog. de vapeur condensée et ramenée à 50°.

Pour fournir 1 calorie il faut $\frac{1^k}{586}$,

Et pour en fournir 98148,44 il faut $\frac{98148,44}{586}$ ou $167^k,488$.

HUITIÈME QUESTION.

Un vase en cuivre, pesant 2200^{gr}, contient 3625^{gr} d'eau à 15°. On jette dans cette masse d'eau un morceau de fer pesant 305^{gr} à sa sortie d'un fourneau porté au rouge. La température du mélange monte à 22°.

Chaleur spécifique	du cuivre	0,095.
— —	du fer	0,113.

Quelle est la température du fourneau ?

Le vase gagne $2200 \times 0,095 \times 7 = 1463$ calories.
L'eau gagne $3625 \times 7 = 25375$ calories.
Le fer supposé à la température x, perd de son côté

$$305 \times 0,113 \times (x - 22).$$

On a donc :

$$305 \times 0,113 \times (x - 22) = 1463 + 25375 = 26838.$$

D'où $$x - 22 = \frac{26838}{305 \times 0,113} = \frac{26838}{34,465} = 778°,7.$$

D'où enfin $$x = 778,7 + 22 = 800,7.$$

CHAPITRE XX.

MÉTÉOROLOGIE.

L'atmosphère qui entoure la terre est loin d'être en équilibre. Elle est, au contraire, dans un état d'agitation continuelle. Parmi les causes perturbatrices, il faut citer en première ligne la radiation solaire. Les rayons calorifiques venus du soleil arrivent aux régions polaires sous une incidence beaucoup plus oblique que dans la région intertropicale; de là une différence de température, et par conséquent de force élastique et de densité, aux différents points d'une même couche sphérique, suivant que l'on prend ces points aux pôles ou à l'équateur. De plus la rotation de la terre devant le soleil a pour effet d'échauffer les points de son contour l'un après l'autre, l'échauffement se propageant de l'est à l'ouest.

De là des courants d'air, mélange des couches froides et des couches chaudes, variation de la température, de la pression atmosphérique. La vapeur d'eau qui s'élève dans l'air, tantôt échauffée avec lui, tantôt refroidie, s'éloigne ou se rapproche de la saturation; elle peut même arriver à se condenser, et forme alors ce que l'on appelle les météores aqueux, pluie, neige, grêle, etc.

L'électricité intervient à son tour pour ébranler par les orages les couches d'air de l'atmosphère.

Nous ne reviendrons point sur l'étude des météores électriques, question qui a déjà été traitée. Nous nous bornerons à l'étude des météores aqueux qui sont les plus importants à connaître.

L'étude de la météorologie n'a pas un simple but de curiosité; elle se lie évidemment à la science de l'agriculture et de l'hygiène. Malheureusement c'est une science toute de statistique pour ainsi dire, et l'on ne possède encore qu'un bien petit nombre des faits qui seraient nécessaires pour pouvoir poser des lois. Aussi nous bornerons-nous à l'exposé des phénomènes principaux, sans entrer dans la discussion des systèmes plus ou moins problables imaginés pour les expliquer.

Température moyenne. — Si dans un même lieu on ob-

serve le thermomètre à des intervalles de temps rapprochés, d'heure en heure, par exemple, et si, ajoutant les vingt-quatre observations faites pour un jour, on divise la somme par le nombre 24, on aura ce que l'on appelle la température moyenne du jour. Mais on a remarqué que la moyenne de quatre observations faites à 9 h. du matin, à midi, à 3 h. et à 9 h. du soir, donnait très-sensiblement le même nombre; on peut donc se borner à ces quatre observations. Si maintenant on ajoute entre elles les trente moyennes des jours d'un mois, et qu'on divise leur somme par 30, on a la moyenne du mois, et de même en ajoutant les 12 moyennes mensuelles, et divisant leur somme par 12, on a ce que l'on appelle la moyenne annuelle.



Fig. 210.

Or, lorsqu'on détermine dans une localité les moyennes annuelles pour un certain nombre d'années consécutives, on trouve que ces moyennes sont égales entre elles, à de très-légères différences près, tantôt en plus, tantôt en moins. Dès lors la température d'un lieu varie dans une certaine limite, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous d'une température fixe, qu'on peut appeler la température moyenne du lieu, et que l'on obtient en ajoutant, par exemple, 30 moyennes annuelles consécutives, et divisant leur somme par 30. On a trouvé ainsi que la moyenne pour Paris est de 10°,8.

Il importe aussi de connaître le maximum et le minimum de la température pour la journée et les heures de ces maximum et minimum. L'observation se fait au moyen d'un instrument appelé *thermométrographe*. C'est un thermomètre à alcool dont la colonne alcoolique, renversée de haut en bas, est suivie d'une longue colonne de mercure *mim'*; un petit index en émail ou en verre, entouré d'un cheveu, afin de presser légèrement sur les parois du tube, repose sur chacune des extrémités de la colonne de mercure (fig. 210). Si le thermomètre s'échauffe, l'alcool pousse le mercure, et l'index *h* monte ; mais si le thermomètre se refroidit, cet index, soutenu par son cheveu, reste en place et indique alors le maximum de la température. L'abaissement de la température fait, au contraire, monter l'index qui indique alors le mini-

mum. Le minimum a ordinairement lieu au lever du soleil, et le maximum vers 1 h. ou 2 h. de l'après-midi. Pour nous, le maximum de température de l'année a lieu ordinairement à la fin de juillet ou vers le commencement d'août, et le minimum dans les premiers jours de janvier.

Si nous déterminons par les mêmes méthodes les moyennes températures en divers points d'un même méridien, nous trouvons que la moyenne devient de plus en plus élevée au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'équateur. Il s'en faut cependant que l'accroissement soit très-régulier ; car la hauteur du lieu au-dessus du niveau de la mer a une grande influence sur sa température. Tout le monde sait que, lorsqu'on gravit une haute montagne, on a à souffrir du froid, et d'autant plus que la montagne est plus élevée. Les ascensions aérostatiques, si répétées depuis quelques années, ont montré également que la température décroît dans les couches d'air au fur et à mesure que l'on monte. Quant à la loi de ce décroissement, elle est loin d'être connue. Cette influence de l'altitude est encore attestée par la présence de neiges perpétuelles sur le sommet des hautes montagnes, même dans les régions équatoriales ; seulement la limite des neiges perpétuelles est d'autant plus élevée que la latitude est moindre, et au Spitzberg, au contraire, on peut dire que cette limite est à la surface même du sol.

De plus, la configuration du terrain a une grande importance. On comprend en effet qu'en France deux villes, à la même *altitude*, peuvent avoir cependant des températures moyennes très-différentes, si l'une est protégée contre les vents du nord, qui sont pour nous des vents froids, par une ceinture de hautes montagnes, tandis que l'autre sera exposée sans abri à ces vents glacés.

Enfin le voisinage des mers exerce aussi une influence marquée sur la température moyenne. La température des îles est beaucoup plus uniforme que celle des continents ; il y a moins de différence entre la température de l'hiver et celle de l'été, et la moyenne y est plus élevée en général.

Lignes isothermes. — On appelle *ligne isotherme* la courbe sinueuse et souvent très-irrégulière qui comprend tous les points à la surface de la terre pour lesquels la température moyenne est la même. Dans la région équatoriale, ces lignes s'écartent assez peu de la forme d'un cercle ; mais, à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur, elles deviennent de plus en plus irrégulières. Dans notre hémisphère, la ligne de — 10° se

divise en deux courbes fermées enserrant chacune un pôle de froid : l'un placé à peu près sur le méridien d'Irkoutsk, au nord de la Sibérie ; l'autre au détroit de Barrow, à la partie la plus élevée de l'Amérique septentrionale. Les lignes isothermes sont moins bien connues dans l'hémisphère austral, à cause de l'absence presque complète de continent.

Climats. — Le *climat* d'un pays, et par suite l'ensemble des espèces végétales ou animales qu'il peut nourrir, ne dépend pas seulement de sa température moyenne; il est surtout réglé par l'amplitude des variations qu'éprouve la température pendant la série des saisons ; il est évident qu'un pays où la température varie de —10°, température moyenne de l'hiver, à 30° température moyenne de l'été, ne peut avoir ni la même flore ni la même faune qu'un pays où la température varierait seulement de 0° à 20°, quoique dans les deux la moyenne totale soit la même, 10°. On appelle *climats constants* ceux pour lesquels les deux températures moyennes de l'hiver et de l'été ne diffèrent pas de plus de 8 à 10°. Tel est, par exemple, le climat de Madère, de Quito, etc. — Les climats *tempérés* sont ceux où cette différence peut atteindre une quinzaine de degrés. La plupart des villes de l'Europe sont dans ce cas. Enfin, si la différence va à 25 ou 30°, alors le climat se dit *excessif*. Telles sont les villes de New-York, d'Albany, de Pékin.

Si, au lieu de nous élever au-dessus de la surface du sol, nous pénétrons, au contraire, dans sa profondeur, nous constatons d'abord un fait auquel on devait s'attendre : c'est que les variations, si grandes à la surface, s'effacent petit à petit au fur et à mesure qu'on observe des couches plus profondes ; si bien qu'à Paris, par exemple, la couche qui est à 27 mètres du sol garde une température absolument fixe et sensiblement égale à la température moyenne à la surface, un peu plus élevée cependant.

Cette *couche invariable* se retrouve partout, en tout pays, mais à une profondeur tantôt plus grande, tantôt plus petite.

Si l'on s'enfonce plus profondément encore, alors la température, fixe dans chaque couche, s'élève assez rapidement ; son accroissement est d'environ 1° par 33 mètres. On sait quelles conséquences la géologie a tirées de cette importante observation, et les hypothèses qui en découlent sur l'état de la masse interne de notre globe.

Rayonnement terrestre. — Représentons-nous la terre suspendue dans l'espace et rayonnant de la chaleur autour

d'elle, en même temps qu'elle en reçoit du soleil, des planètes et même des étoiles. Si nous ne considérons que l'effet total produit, les travaux sur la chaleur de l'illustre Fourier nous démontrent que l'équilibre est sensiblement établi et que la moyenne générale de la terre est actuellement à peu près invariable. Mais si nous nous attachons à un point déterminé de la surface, alors, quoique la moyenne y soit aussi constante, nous avons, comme nous l'avons dit, des variations, soit pendant la durée du jour, soit pendant la durée de l'année. Ces variations trouvent leur explication précisément dans les phénomènes du rayonnement. Pendant la nuit, le point que nous considérons perdant plus de chaleur qu'il n'en reçoit, puisque les rayons solaires ne l'atteignent pas, doit prendre une température de plus en plus basse. Mais, à partir du moment où le soleil reparaît au-dessus de l'horizon, la chaleur solaire tend à rétablir l'équilibre. La température va donc remonter. Et comme, au fur et à mesure que le soleil s'élève, ses rayons tombent moins obliquement, la quantité de chaleur versée par cet astre dépassera bientôt celle que la terre perd dans le même temps par le rayonnement, et tant qu'elle la dépassera, la température montera; c'est à midi que la différence sera la plus grande possible; mais ce n'est pas à midi qu'a lieu le maximum, parce que, après midi, le soleil verse encore sur la terre plus de chaleur qu'elle n'en perd; mais, après une certaine heure, variable avec les saisons, le soleil donnera moins de chaleur que la terre n'en perd : dès lors la température s'abaissera, et elle baissera surtout une fois que le soleil sera descendu au-dessous de l'horizon. Nous trouvons donc ainsi expliqués le maximum et le minimum de chaque jour.

Observons maintenant qu'en hiver, pour nous au moins, la terre est plus près du soleil, il est vrai; mais les rayons solaires nous arrivent sous une incidence plus oblique, et de plus le jour est plus court que la nuit. Il en résulte que la somme de chaleur versée dans la durée du jour sur le point particulier que nous considérons est moindre que la somme de chaleur perdue par le sol dans le même temps : de là refroidissement progressif; le maximum de froid n'a pas lieu nécessairement au jour même du solstice; il peut avoir lieu plusieurs jours plus tard; mais il arrive un moment où les rayons nous venant moins obliquement, et les jours ayant augmenté en longueur, l'équilibre se rétablira entre la quantité de chaleur versée par le soleil et la quantité de chaleur rayonnée par le sol; alors la

température montera de jour en jour; mais le maximum n'a pas lieu, au solstice d'été, au 21 juin ; il a lieu plus tard, précisément pour la même raison qui fait que le maximum de température du jour n'est pas à midi, mais à deux heures.

Vapeur d'eau atmosphérique. — L'air contient de la vapeur d'eau ; la présence des nuages, la formation des brouillards, la chute de la pluie, de la neige en sont autant de preuves. Quant à l'existence de cette vapeur, elle s'explique par l'évaporation qui s'opère continuellement à la surface des grandes masses d'eau qui couvrent la terre.

La quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume donné d'air, en un lieu déterminé, varie continuellement, tant à cause de l'influence qu'ont les changements de la température sur l'activité de l'évaporation, que par suite du déplacement des couches de l'atmosphère, qui amène tantôt de l'air venant de la mer, tantôt de l'air venant des continents et des contrées sèches et froides. En second lieu, les changements de la température ont pour effet d'éloigner ou de rapprocher la vapeur de l'état de saturation. On dit que l'air est *humide* lorsqu'un faible refroidissement on une petite augmentation de la pression suffit pour déterminer la condensation de la vapeur qu'il renferme ; on dit, au contraire, qu'il est sec lorsque la vapeur est éloignée de la saturation, quelle que soit d'ailleurs, dans l'un et dans l'autre cas, la quantité absolue de la vapeur contenue. Le maximum de sécheresse, c'est l'absence complète de vapeur ; le maximum d'humidité, c'est l'état de saturation. Entre ces limites extrêmes, l'air peut être plus ou moins sec, plus ou moins humide. On prend pour mesure de l'état d'humidité, ou état *hygrométrique* de l'air, le rapport entre le poids de la vapeur existant dans un volume d'air et le poids de vapeur qui s'y trouverait si l'air était saturé à la même température. C'est donc le rapport entre la densité réelle de la vapeur et la densité à l'état de saturation à la même température. Et comme à température égale les densités d'un fluide gazeux sont proportionnelles à ses tensions, on peut encore prendre pour mesure de l'état hygrométrique le rapport entre la tension de la vapeur répandue dans l'air et la tension maximum à la même température.

Hygromètre. — On donne le nom d'hygromètre aux instruments propres à mesurer l'état d'humidité de l'air. Le seul que nous décrirons est l'hygromètre à cheveu de Saussure, dont l'usage est le plus facile et le plus expéditif.

Il se compose (fig. 211) d'un cadre en métal portant à sa traverse supérieure une pince *b* qui sert à fixer l'extrémité d'un cheveu long, fin et convenablement dégraissé par une immersion dans l'éther ou dans un liquide alcalin; l'autre extrémité de ce cheveu s'enroule sur l'une des gorges d'une petite poulie. Une seconde gorge de cette même poulie est enveloppée d'un fil roulé en sens contraire du cheveu et supportant un contre-poids de quelques décigrammes seulement, *f*.

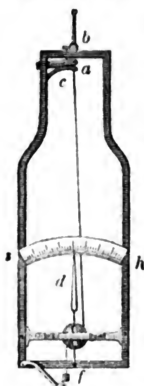


Fig. 211.

Le cheveu, comme beaucoup de substances organiques d'ailleurs, tend à se mettre dans un certain état d'équilibre d'humidité avec l'air qui l'entoure. Quand cet air se sature, le cheveu absorbe de l'humidité et s'allonge; quand, au contraire, l'air se dessèche, le cheveu se dessèche en même temps et se contracte; la poulie tourne alors dans un sens ou dans l'autre, tantôt tirée par le cheveu, quand il se contracte; tantôt, quand le cheveu se relâche, tirée dans le sens contraire par le contre-poids. Une aiguille *d*, fixée au centre de la poulie, parcourt les divisions d'un cadran *sh*, et indique ainsi le plus ou moins d'humidité de l'air. Pour établir cette graduation, on introduit l'instrument sous une cloche dont les parois sont couvertes de gouttelettes d'eau, pour amener l'air à saturation, et l'on note le point où s'arrête l'aiguille quand elle est devenue stationnaire, et là on marque 100°; c'est le point d'*humidité extrême*. Puis on introduit l'instrument, en même temps que des matières fortement desséchantes (chaux vive, chlorure de calcium fondu ou acide sulfurique concentré), sous une seconde cloche, et quand l'aiguille est devenue de nouveau immobile, on note la position et on la marque O; c'est le point de *sécheresse extrême;* et l'on divise l'intervalle en cent parties égales. En introduisant ensuite l'instrument dans un espace qui contient de la vapeur à des degrés de tension très-divers, vapeur fournie par des dissolutions aqueuses plus ou moins concentrées, on peut dresser une table de relation entre les degrés de l'instrument et les états hygrométriques. Cette table est indispensable, car il n'y a pas du tout proportion entre le nombre de degrés marqués et l'état d'humidité réel. Ainsi l'hygromètre à cheveu, introduit dans de l'air à demi saturé, ne marque pas 50°, mais 72°.

La table de relation change d'ailleurs avec la température; aussi la connaissance de cette température est-elle indispensable, et l'hygromètre doit-il être accompagné d'un thermomètre.

Si nous appliquons l'hygromètre à la recherche des variations de l'état hygrométrique de l'air dans un lieu donné, nous voyons que dans l'été l'air est plus sec qu'en hiver, quoiqu'il contienne plus de vapeur d'eau. L'évaporation est en effet plus active à la surface du sol plus échauffé, mais en même temps l'air est plus chaud aussi, et la vapeur est par cela même plus éloignée de la saturation.

Maintenant, dans chaque journée, l'hygromètre marche ordinairement vers la sécheresse au fur et à mesure que la température s'élève, pour remonter ensuite vers l'humidité quand la température s'abaisse.

Dans les journées chaudes de l'été, quand l'évaporation a été très-active, et qu'ensuite, au moment du coucher du soleil, la température redescend rapidement, la vapeur se sature dans les couches voisines du sol, et, se condensant en petites gouttelettes probablement vésiculaires, forme ce que l'on appelle vulgairement le *serein*.

Rosée. — En automne et au printemps, quand les journées sont assez chaudes et les nuits très-fraîches, lorsqu'arrive le matin, la terre, refroidie par le rayonnement nocturne, abaisse la température des couches d'air en contact avec elle, et la vapeur amenée à saturation se dépose. Telle est l'explication du phénomène de la *rosée*, si abondante dans ces deux saisons de l'année. Tout ce qui tend en effet à augmenter l'activité du rayonnement terrestre, la pureté de l'air, l'absence de nuages et de tout corps qui pourrait renvoyer de la chaleur vers le sol, augmente par cela même la rosée : et il est important de remarquer que ce sont les corps qui ont le plus grand pouvoir rayonnant qui reçoivent le dépôt le plus abondant. Le dépôt formé sur les métaux polis, dont le pouvoir émissif est si faible, est toujours l'indice d'un refroidissement général très-intense.

Givre. — Si, au moment où la rosée se dépose, les corps solides qui reçoivent ce dépôt ont une température inférieure à zéro, ou bien si, après le dépôt de la rosée, la température continue à descendre et dépasse cette limite, la rosée gèle et devient ce que l'on appelle le *givre* ou la *gelée blanche*.

Brouillards, nuages. — Les brouillards et les nuages ont la même origine que le serein; ils sont le résultat d'un re-

froidissement qui amène la condensation de la vapeur, dans les couches inférieures s'il s'agit d'un brouillard, dans les couches élevées de l'air s'il s'agit des nuages. La région des nuages ne dépasse guère en hauteur 5000 à 6000 mètres au-dessus du sol. Les nuages les plus élevés sont ces petits nuages floconneux et déliés qui troublent à peine la transparence de l'air dans les jours sereins, et que l'on appelle en météorologie des *cirrhus*. Les gros nuages arrondis à leur partie supérieure, et que l'on appelle *cumulus*, sont dans une région beaucoup plus basse. Les nuages descendent rarement au-dessous de 300 mètres, à moins qu'ils ne se résolvent en pluie; alors ils prennent le nom de *nimbus*.

La suspension des nuages s'explique, et par l'état vésiculaire de leurs gouttelettes, ce qui rend leur densité moyenne peu supérieure à celle de l'air qui les entoure, et par leur mouvement de transport. Que leurs gouttelettes grossissent et se changent en sphères pleines, ou bien que leur vitesse se ralentisse, et alors ces gouttelettes tombent et forment la pluie. Mais la pluie ne tombe pas toujours jusqu'à terre, comme l'a fait remarquer M. Saigey; il peut se faire que, traversant dans leur chute des couches plus chaudes, ces gouttes s'évaporent complétement à une distance plus ou moins grande de la terre; alors, redevenues vapeur plus légère que l'air, elles remontent pour se condenser de nouveau et retomber encore. Mais en s'évaporant elles refroidissent les couches d'air au sein desquelles cette évaporation s'effectue, et bientôt, par cela même, elle ne pourra plus avoir lieu, et la pluie finira par arriver au sol.

Neige ; grêle. — Si les couches supérieures éprouvent un refroidissement subit et très-grand, la vapeur passe tout de suite à l'état solide, en cristallisant d'une manière confuse, et alors elle forme la *neige*. Si ce sont les gouttelettes d'eau qui se sont gelées, on a, non pas de la neige, mais du *grésil* ou de la *grêle*, suivant la grosseur des petites masses solides. On a souvent vu des grêlons acquérir la grosseur d'œufs de pigeon ou de poule. Leur suspension devient alors difficile à expliquer, car la vitesse des nuages de grêle n'est pas toujours très-grande. Peut-être l'explication donnée par Volta, toute vicieuse qu'elle est en plusieurs points, n'est-elle pas encore la plus mauvaise, car les nuages de grêle sont toujours des nuages électriques, et la grêle est le plus souvent accompagnée d'orage. Mais l'électricité développée est-elle la cause ou la conséquence de la suspension des grêlons ? c'est ce qu'il est fort difficile de décider.

Vents. — Les différences considérables de température que nous avons constatées sur la surface du globe, puis d'autre part la condensation de la vapeur qui produit des changements brusques dans la pression, déterminent des mouvements de transport dans les masses d'air ; telle est la cause des vents.

On distingue les vents en vents réguliers, vents périodiques et vents irréguliers.

Parmi les vents réguliers, nous citerons les vents *alizés*, qui soufflent constamment sur l'océan Atlantique, des côtes de l'Europe vers celles de l'Amérique, de l'E. à l'O., ou du N. E. au S. O., et qui ont leur origine dans la différence de température des régions polaires et des régions équatoriales. Lorsqu'on ouvre, dans une salle dont l'air est fortement échauffé, une fenêtre qui établisse la communication avec l'air froid du dehors, on constate que la flamme d'une bougie placée à la partie inférieure de la baie est fortement poussée de dehors en dedans; tandis que, si on la présente au haut de l'ouverture, elle est poussée au contraire de dedans en dehors. Ainsi l'air froid entre dans la chambre par le bas de l'ouverture en même temps que l'air chaud s'échappe par le haut. De même il s'établit à la surface de la terre un courant d'air froid marchant du pôle à l'équateur; et dans les régions supérieures, au contraire, l'air chaud se déverse de la région équatoriale sur les pôles. C'est ce mouvement des couches d'air inférieures qui, combiné avec le mouvement de rotation diurne de la terre, produit les vents alizés. Dans l'hémisphère austral, ces vents alizés se retrouvent moins puissants, il est vrai, et soufflant du S. E. au N. O., ou de l'E. à l'O.

Les vents périodiques de l'océan Indien, appelés *moussons*, s'expliquent aussi facilement. D'avril en octobre le vent souffle, au nord de l'équateur, du S. O., le continent africain étant moins chaud alors que celui de l'Inde ; tandis qu'au contraire, d'octobre en avril, saison d'été pour le midi de l'Afrique, la mousson souffle du N. E. Dans l'hémisphère sud, tout entier occupé par les mers, la région équatoriale étant toujours plus chaude que les régions à latitude plus élevée, la mousson devient vent régulier et souffle constamment du S. E.

La brise de mer qui se produit sur les côtes doit aussi être comptée parmi les vents périodiques, mais périodiques diurnes. La terre s'échauffe et se refroidit plus vite que la mer. Aussi, pendant le jour, le vent souffle de la mer vers la côte, et le soir il est remplacé par la brise de terre. Mais sur les conti-

nents il ne peut plus y avoir que des vents irréguliers. Cependant, dans une localité donnée, il y a toujours un certain vent dont la fréquence est plus grande. Ainsi, pour nous, habitants de la France, le vent du S. O. est celui qui souffle le plus fréquemment. Ce vent, qui nous arrive chargé de vapeurs, nous apporte presque toujours la pluie. Il en est de même des vents de l'ouest et du sud; tandis que les vents de l'est, du nord-est et du nord nous viennent de contrées sèches ou froides, et nous apportent le plus souvent le beau temps.

L'étude des météores lumineux, halos, couronnes parhéliques, aurores boréales, est de beaucoup trop compliquée pour que nous puissions l'entreprendre dans ce petit ouvrage, où la météorologie n'est pour ainsi dire qu'un accessoire; je me bornerai à l'étude succincte de deux phénomènes bien connus : le mirage et l'arc-en-ciel.

Mirage. — Tout le monde sait que dans de vastes plaines sablonneuses, comme les déserts de l'Afrique, fortement échauffées par le soleil, le voyageur est souvent exposé à une étrange illusion. Il voit au loin les objets disséminés : arbres, rochers, etc., accompagnés d'une image plus pâle, qui apparaît à leur pied comme le résultat d'une réflexion, et il croit à l'existence d'une masse d'eau formant miroir; puis, quand il arrive auprès de ces objets, il ne trouve que le sable desséché du désert. Ce phénomène, si souvent décrit, est produit par la réflexion totale.

Les couches d'air en contact avec le sol s'échauffent et prennent une densité moindre que celles qui sont au-dessus. De

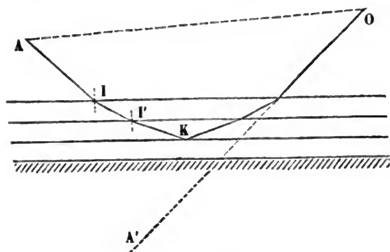


Fig. 212.

sorte qu'à partir du sol la densité va en croissant jusqu'à une certaine hauteur, au-dessus de laquelle la loi régulière de décroissement se rétablit. Il suit de là qu'un certain rayon AI (fig. 212)

parti du point lumineux A, arrivant à une couche d'air moins dense, s'écartera de la normale au lieu de s'en rapprocher; même effet en I; mais bientôt l'incidence deviendra égal à l'angle limite; alors le rayon sera réfléchi totalement en K; il se relèvera de plus en plus en remontant vers des couches plus denses, et arrivera à l'œil placé en O, et qui apercevra alors le point lumineux sur la ligne OA, par la propagation directe, et aussi sur la direction OA', par le fait de la réflexion totale. C'est cette double vision du même point qui fait croire à l'existence d'une nappe d'eau formant miroir.

Le mirage se produit aussi quelquefois en mer, ou bien sur des côtes à pic, ou encore sur des montagnes arides frappées par un rayonnement intense.

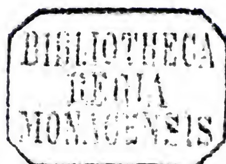
Arc-en-ciel. — Quant à l'arc-en-ciel, il est produit par les rayons du soleil, qui, tombant sur les gouttes d'eau d'un nimbus, sont d'abord réfractés, puis réfléchis totalement à l'intérieur des gouttes, et reviennent ensuite à l'œil de l'observateur après avoir éprouvé la dispersion par le fait de l'inégale réfrangibilité des rayons colorés dont se compose la lumière blanche. L'arc-en-ciel ne peut être observé qu'autant que le soleil n'a pas au-dessus de l'horizon une hauteur de plus de 41°. Il faut en outre que l'observateur soit placé entre le nuage et le soleil. L'arc-en-ciel présente toutes les couleurs du spectre, depuis le violet, qui forme la bande interne, jusqu'au rouge, qui forme la bande extérieure.

Assez souvent cet arc-en-ciel est accompagné d'un second arc plus pâle, de rayon plus grand, et dans lequel les couleurs sont rangées en ordre inverse, le rouge en dedans et le violet en dehors. Les rayons qui donnent naissance à cet arc sont ceux qui subissent deux réflexions totales successives avant de sortir des gouttes d'eau.

FIN

TABLE DES MATIÈRES.

FIN DE LA TABLE.



Ch. Lahure et Cie, imprimeurs du Sénat et de la Cour de Cassation,
rue de Vaugirard, 9, près de l'Odéon.

